

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroniky

**Elektronická zátěž řízená mikropočítačem
s možností připojení k PC**

**Electronic Load Controlled by Microcomputer with
PC Connection Possibility**

2015

Bc. Vojtěch SALZMANN

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Salzmann**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T015 Elektronika

Téma: Elektronická zátěž řízená mikropočítačem s možností připojení k PC
Electronic Load Controlled by Microcomputer with PC Connection
Possibility

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor funkce elektronických zátěží s ohledem na různé režimy provozu.
2. Navrhněte a realizujte elektronickou zátěž umožňující volbu režimu provozu s možností připojení k PC prostřednictvím RS232 nebo USB.
3. Vytvořte ovládací program pro PC umožňující nastavování parametrů zátěže, měření aktuálních hodnot napětí a proudu a jejich zpracování.
4. Na realizovaném vzorku elektronické zátěže proveďte měření ověřující jeho funkčnost v jednotlivých režimech provozu.

Seznam doporučené odborné literatury:

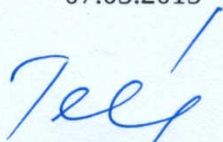
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. 5. 2015

Vítězslav Salamon

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Palackému, Ph.D. za volnost při vývoji a konstrukčním zpracování zátěže. Dále děkuji Bc. Vojtěchu Schreierovi za nalakování krytů přístrojové skříňky.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh a realizaci elektronické zátěže, která může být použita k měření a zkoušení různých napájecích zdrojů. Vlastnosti zátěže je možné nastavovat přímo na ovládacím panelu přístroje, případně prostřednictvím PC s nainstalovaným ovládacím programem. V přístroji jsou použity běžné analogové a logické integrované obvody, pro řízení a komunikaci je použit 8bitový mikropočítač Atmel řady AVR. Zařízení pro svou činnost nepotřebuje žádné další přístroje (kromě zkoušeného napájecího zdroje).

Klíčová slova

elektronická zátěž, zkoušení napájecích zdrojů

Abstract

This thesis is focused on proposal and realization of an electronic load, which can be used for measuring and testing of various power supplies. Parameters of the load can be adjusted directly on the machine control panel, alternatively via PC with installed control software. The device is assembled from common analog and logic integrated circuits, 8bit microcontroller Atmel AVR series is used for control and communication. The device doesn't need other instruments for its correct function (except for power supply tested).

KeyWords

electronic load, power supply testing

Seznam použitých zkratk:

ADC (A/D) – analogově digitální převodník

DAC (D/A) – digitálně analogový převodník

EZ – elektronická zátěž

FIFO – zásobníková paměť typu fronta

ICSP – sériové programování přímo v zapojení

IO – integrovaný obvod

JTAG – rozhraní pro programování mikropočítačů

LSB – nejnižší bit

MCU – mikropočítač

MSB – nejvyšší bit

NTC – záporný teplotní součinitel (např. u termistorů)

OZ – operační zesilovač

PC – osobní počítač

RAM – paměť s libovolným přístupem

ŘJ – řídicí jednotka

SPI – sériové rozhraní pro komunikaci mezi obvody, případně programování

UART – zařízení pro asynchronní sériovou komunikaci (v PC)

USART – zařízení pro synchronní i asynchronní sériovou komunikaci (v MCU)

Z – stav vysoké impedance

Obsah:

1. Úvod	9
2. Popis funkce elektronických zátěží	10
2.1 Režim konstantního proudu	10
2.2 Režim konstantního odporu	12
2.3 Režim konstantního napětí	16
3. Návrh a popis zapojení elektronické zátěže	18
3.1 Celkový popis přístroje	18
3.2 Napájecí zdroj	19
3.3 Elektronika panelu	21
3.4 Řídicí jednotka	24
3.5 Výkonová část	32
3.6 Mechanická konstrukce přístroje	34
4. Popis programu	36
4.1 Program řídicího mikropočítače	36
4.2 Ovládací program pro PC	38
4.3 Popis komunikace PC ↔ zátěž	39
5. Návod k obsluze elektronické zátěže	43
6. Ověření funkčnosti zátěže	49
6.1 Přesnost měření napětí a proudu	49
6.2 Provoz v proudovém režimu	50
6.3 Provoz v odporovém režimu	52
6.4 Provoz v napětíovém režimu	54
7. Závěr	56
Použitá literatura:	57
Seznam příloh:	58

1. Úvod

Elektronická zátěž je zařízení používané pro zkoušení a zjišťování parametrů různých napájecích zdrojů. Její hlavní výhodou oproti klasickým zátěžím (žárovka, drátový odpor, reostat) je možnost přesnějšího nastavení parametrů zátěže. Nejjednodušší elektronickou zátěž lze sestavit pouze z výkonového tranzistoru, potenciometru a několika dalších součástek a lze ji docela dobře použít k nenáročnému statickému zkoušení napájecích zdrojů (tedy zkoušení při nějakém stálém napětí a proudu). Nicméně pokud má elektronická zátěž sloužit jako alespoň trochu seriózní měřicí přístroj, je potřeba volit poněkud složitější obvodové řešení umožňující dosáhnout lepších výsledků. Při použití mikropočítače jako řídicího členu zátěže je možné doplnit přístroj dalšími funkcemi a výsledné zapojení je jednodušší, než při použití „obyčejných“ součástek a obvodů. To je dáno možnostmi řešit většinu funkcí programově. Navíc dnes dostupné 1čipové 8bitové mikropočítače, které pro řízení zátěže postačují, mají vestavěné různé periferie (A/D převodník, řadič sériové linky USART, několik čítačů/časovačů, analogový komparátor, SPI rozhraní apod.), což výslednou konstrukci dále zjednodušuje.

Přístroj, jehož konstrukce je dále popisována, je řízen mikropočítačem Atmel řady AVR a může pracovat buď samostatně (ovládání z čelního panelu), nebo při spojení s osobním počítačem přes USB rozhraní (resp. sériový port RS-232) umožňuje dálkové řízení z PC, případně záznam a ukládání naměřených hodnot. Aby byl přístroj prakticky použitelný, je vybaven různými funkcemi, které slouží k ochraně elektronické zátěže a připojeného zdroje při chybě obsluhy (překročení mezních parametrů) nebo při poruše zátěže (porucha napájecího zdroje, přehřátí...).

2. Popis funkce elektronických zátěží

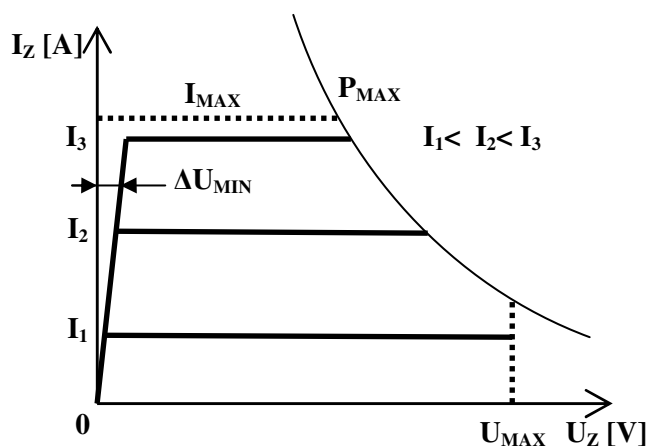
Elektronické zátěže mohou pracovat ve 3 základních provozních režimech:

- režim konstantního proudu
- režim konstantního napětí
- režim konstantního odporu

2.1 Režim konstantního proudu

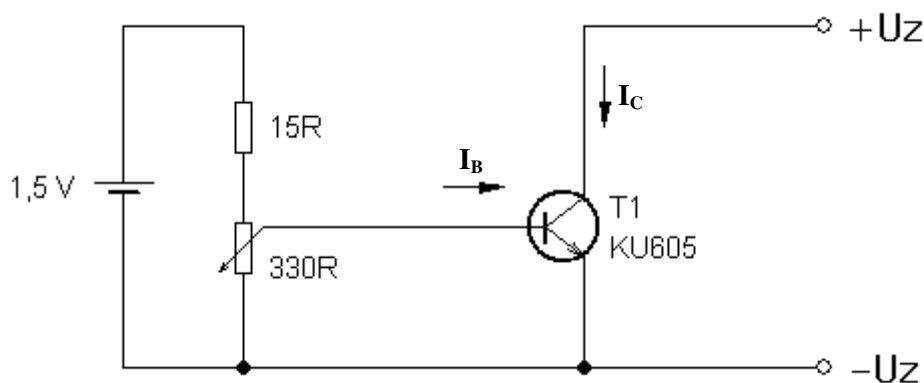
V tomto případě zátěž odebírá ze zdroje nastavený proud bez ohledu na napětí, takže tento režim je dobře použitelný ke zkoušení běžných napájecích zdrojů (stabilita výstupního napětí, vnitřní odpor) a dále k měření vybíjecí charakteristiky akumulátorů (zjištění vnitřního odporu, kapacity).

Na obr. 1 jsou znázorněny typické průběhy napětí a proudu při zátěži v režimu konstantního proudu. Při nízkých hodnotách napětí nelze docílit požadovaného proudu v důsledku úbytku napětí na výkonové části zátěže ΔU_{MIN} . Výkonové tranzistory zátěže jsou plně otevřeny, protože žádaná hodnota proudu převyšuje skutečný proud, nicméně na tranzistorech vzniká úbytek napětí. Další úbytky vznikají na vyrovnávacích odporech jednotlivých tranzistorů (pokud jsou použity), na proudovém bočníku a teoreticky i na dalších součástech výkonového obvodu (pojistka, vodiče, svorky). Dále k omezení proudu může dojít z důvodu určitého povoleného ztrátového výkonu P_{MAX} (pro proudy I_3 a I_2) a rovněž z důvodu omezení max. napětí (pro proud I_1).



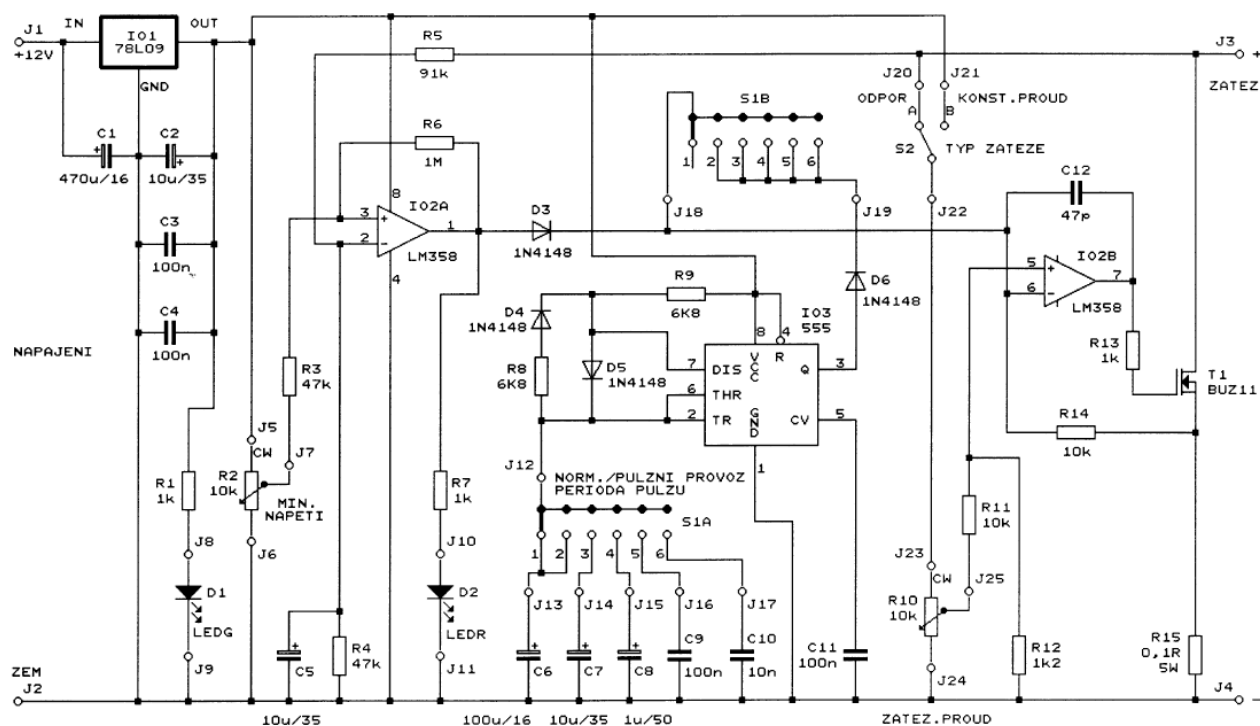
Obr. 1 Pracovní oblast zátěže v režimu konstantního proudu

Zapojení jednoduché elektronické zátěže [1] pracující s přibližně konstantním proudem je na obr. 2. Využívá se proudového zesílení bipolárního výkonového tranzistoru. Proud báze I_B závisí na nastavení potenciometru (a napětí baterie). Proud kolektoru pak závisí na proudu báze. Zapojení nedosahuje nikterak vynikajících parametrů, ale pro základní vyzkoušení zdroje postačuje. Tranzistor T1 lze nahradit např. BD711.



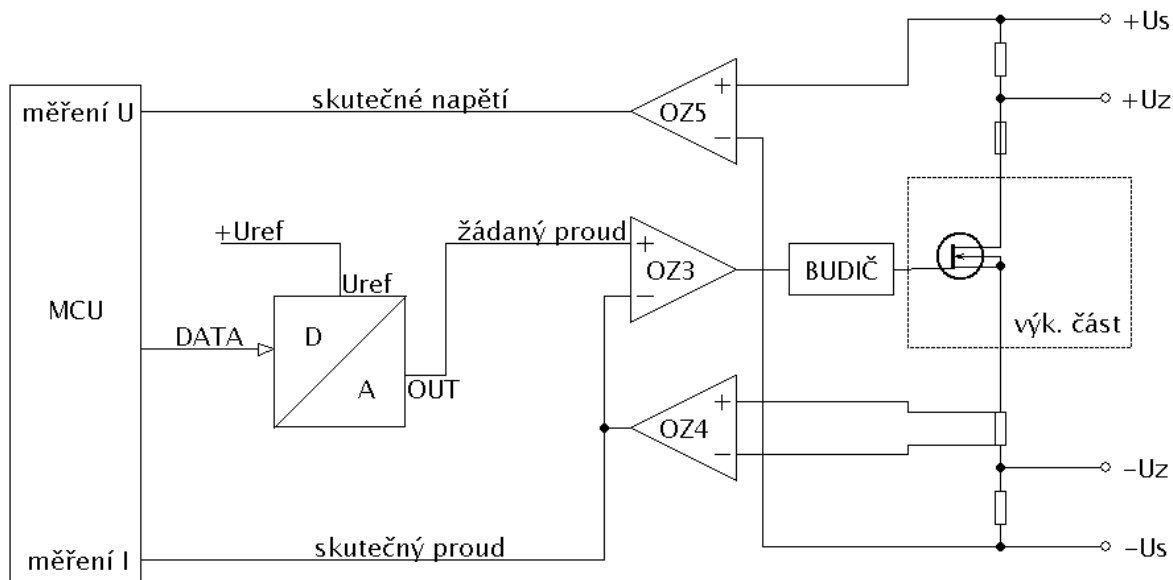
Obr. 2 Jednoduchá elektronická zátěž

Princip zátěže s konstantním proudem a lepšími parametry lze popsat na zapojení na obr. 3. Skutečný proud se měří jako úbytek napětí na odporu R15 přivedený na invertující vstup operačního zesilovače IO2B. Napětí odpovídající žádané hodnotě proudu se přivádí na neinvertující vstup OZ z potenciometru R10 napájeného konstantním napětím. Děličem R11-R12 je toto napětí upraveno na úroveň 0–1V odpovídající napětí z bočnicku R15. OZ tedy pracuje jako komparátor žádané a skutečné hodnoty proudu a řídí otevření výstupního tranzistoru T1. Zapojení je vyzkoušené, řídicí část funguje spolehlivě, pro dosažení větší zatížitelnosti je vhodné tranzistor T1 nahradit paralelní kombinací více tranzistorů a jako bočník R15 použít odpor s vyšší ztrátovým výkonem.



Obr. 3 Příklad složitějšího zapojení elektronické zátěže [2]

Na obr. 4 je blokové schéma elektronické zátěže řízené MCU, pracující v režimu konstantního proudu. OZ4 je zapojen jako rozdílový zesilovač úbytku napětí na bočnku, na jeho výstupu je tedy napětí odpovídající skutečné hodnotě proudu. To je v komparátoru OZ3 porovnáváno s napětím odpovídajícím žádanému proudu, které udává MCU prostřednictvím D/A převodníku. Referenční napětí D/A převodníku, určující jeho max. výstupní napětí, má stálou hodnotu (např. 4,096 V). OZ5 pracuje jako rozdílový zesilovač napětí na zátěži, v tomto případě není přímo zapojen do regulační smyčky. Výstupy OZ4 a OZ5 jsou zavedeny do vstupů A/D převodníku vestavěného v MCU.

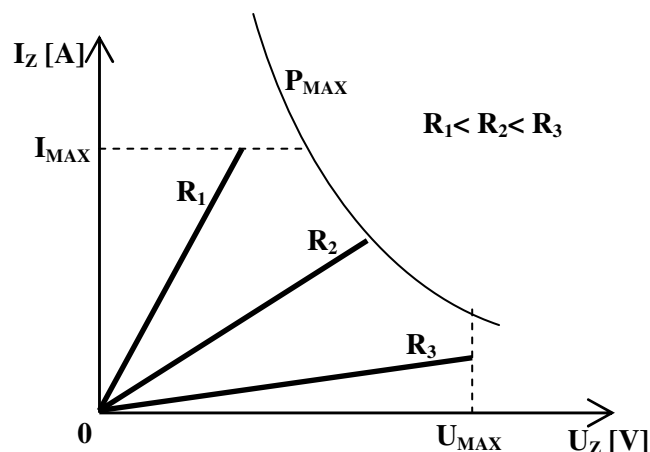


Obr. 4 Blokové schéma zátěže při řízení z MCU (režim I)

2.2 Režim konstantního odporu

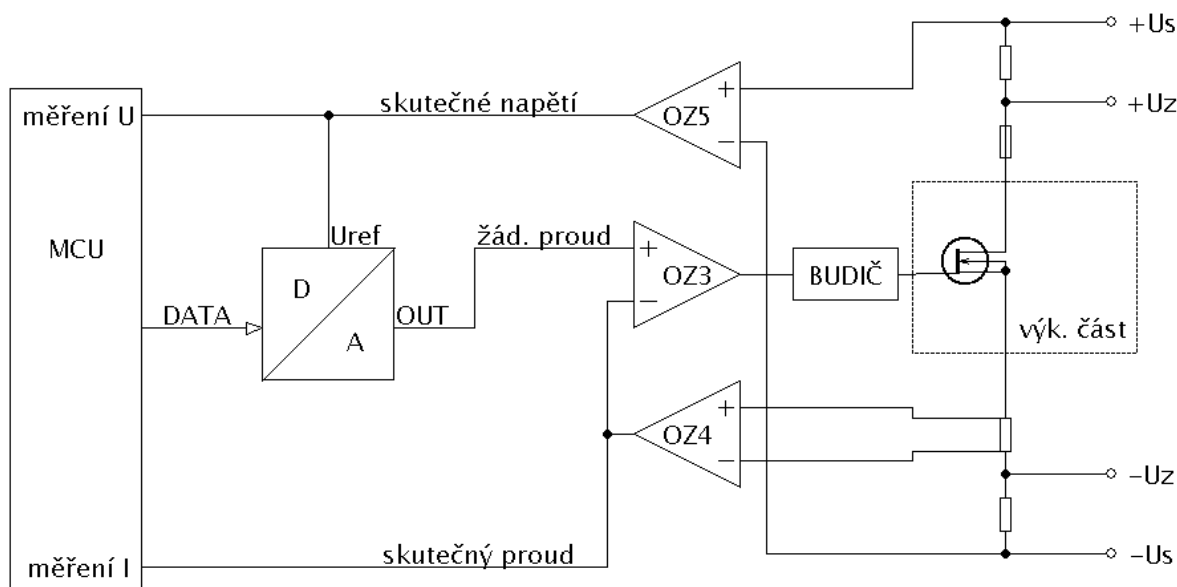
Pokud má mít elektronická zátěž charakter odporu, musí být protékající proud přímo úměrný napětí na zátěži. V tomto režimu se vlastnosti elektronické zátěže nejvíce blíží klasickým zátěžím (drátový odpor, reostat). Typické průběhy napětí a proudu jsou na obr. 5. Při nízké nastavené hodnotě odporu (R_1) dochází k omezení z důvodu max. povoleného proudu zátěží. Ve střední oblasti (R_2) je omezení dáno max. povoleným ztrátovým výkonem P_{MAX} a při vysokých hodnotách odporů (R_3), kdy je proud i ztrátový výkon poměrně malý, je omezení dáno max. přípustným napětím na zátěži.

Princip činnosti v odporovém režimu lze vysvětlit opět na zapojení z obr. 3. Rozdíl oproti proudovému režimu je pouze ve zdroji napětí pro potenciometr žádané hodnoty. V tomto případě není potenciometr napájen stálým napětím, ale je připojen na svorky zátěže, takže řídicí napětí je ovlivněno kromě natočení potenciometru i hodnotou napětí na zátěži. Stoupne-li napětí na zátěži, stoupne i napětí na potenciometru, tedy žádaná hodnota proudu.



Obr. 5 Pracovní oblast zátěže v režimu konstantního odporu

Mimochodem, zátěž na obr. 3 má ještě další užitečné funkce – pulsní provoz a vypnutí zátěže při dosažení určitého napětí. Pulsní provoz je zajištěn generátorem obdélníkového signálu s obvodem IO3 NE555. Je-li pulsní provoz zapnut (přepínač S1 v poloze 2 – 6), dochází k opakovanému vypínání proudu zátěží. Pokud je na výstupu IO3 (pin 3) kladné napájecí napětí (cca 9 V), je otevřená dioda D6 a toto napětí je přiváděno na invertující vstup OZ IO2B. Výstup OZ přejde do záporné saturace a T1 se zavře. V opačném případě, kdy je na výstupu IO3 nulové napětí, je D6 zavřená a nic se neděje. Vypnutí zátěže při podpětí je zajištěno komparátorem IO2A, který porovnává skutečné napětí na zátěži (přizpůsobené děličem R5-R4) s nastaveným minimálním napětím z potenciometru R2. Odpor R6 zavádí určitou hysterezi, a tak zabraňuje přílišnému kmitání v oblasti rovnosti obou porovnávaných napětí. Pokud napětí na zátěži podkročí nastavenou hodnotu, přes D3 se ovládá IO2B a vypíná T1. Tato funkce je výhodná při vybíjení akumulátoru, kdy zabraňuje přílišnému vybití. Nevýhodou je, že po nárůstu napětí se zátěž opět sama zapne.



Obr. 6 Blokové schéma zátěže při řízení z MCU (režim R)

Na obr. 6 je blokové schéma elektronické zátěže řízené MCU, pracující v režimu konstantního odporu. MCU opět do D/A převodníku vysílá data související se žádaným proudem, nicméně referenční vstup D/A převodníku není napájen ze stálého referenčního napětí, nýbrž ze skutečného napětí na zátěži. Výstupní napětí D/A převodníku odpovídající žádanému proudu je určeno součinem digitálních dat z MCU (odpovídajících nastavené hodnotě odporu) a napětí na zátěži. Při dané hodnotě odporu jsou DATA z MCU do D/A převodníku stále stejné, ovšem při zvýšení napětí na zátěži se zvýší výstupní napětí D/A převodníku a zvýší se přímo úměrně i proud zátěží.

Způsob zjištění dat pro D/A převodník

Uvažujme 12bitový D/A převodník, vstupní data mohou být v rozsahu 0 – 4095.

Výstupní napětí z převodníku je dáno vztahem: $U_{OUT} = \frac{DATA}{4095} \cdot U_{REF}$

Napětí U_{REF} odpovídá napětí na zátěži (po úpravě: $0 - 40 \text{ V} \xrightarrow{/10} 0 - 4 \text{ V}$)

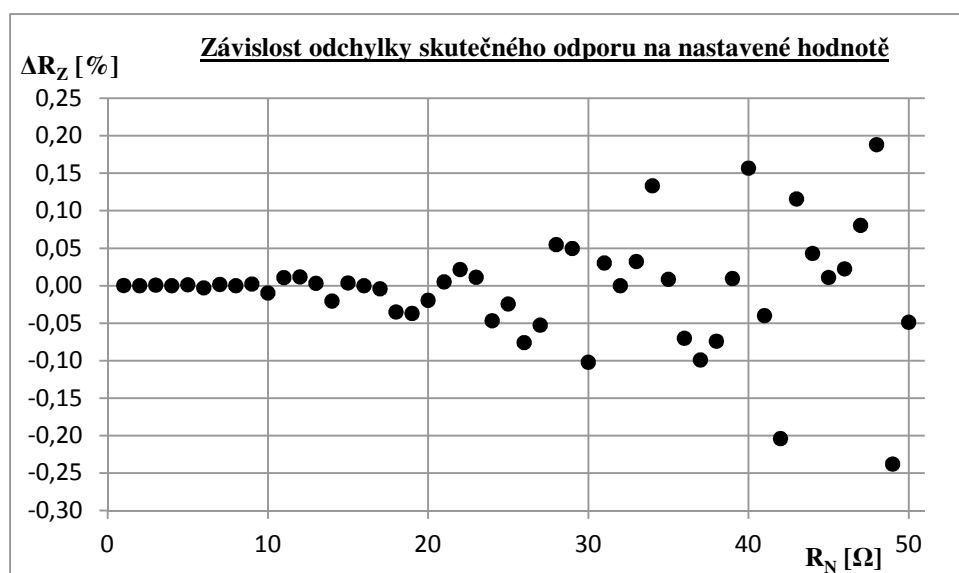
Výstupní napětí převodníku odpovídá žádanému proudu (po úpravě: $0 - 4 \text{ V} \xrightarrow{\cdot 10} 0 - 40 \text{ A}$)

Platí tedy: $U_{OUT} = \frac{I_Z}{10}$ a $U_{REF} = \frac{U_Z}{10}$

Pro danou velikost odporu platí: $R = \frac{U_Z}{I_Z} = \frac{10 \cdot U_{REF}}{10 \cdot U_{OUT}} = \frac{U_{REF}}{U_{OUT}} = \frac{4095}{DATA}$

Takže: $\underline{\underline{DATA = \frac{4095}{R}}}$

Nejmenší velikost odporu, kterého lze zátěží docílit, je 1Ω . Při vyšších hodnotách odporu roste chyba.

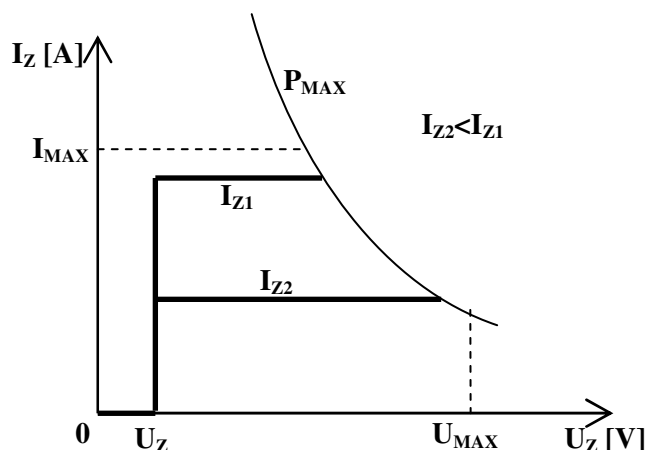


R [Ω]	DATA desítkově	DATA šestnáctkově	R [Ω]	DATA desítkově	DATA šestnáctkově
1	4095	FFF	26	158	9E
2	2048	800	27	152	98
3	1365	555	28	146	92
4	1024	400	29	141	8D
5	819	333	30	137	89
6	683	2AB	31	132	84
7	585	249	32	128	80
8	512	200	33	124	7C
9	455	1C7	34	120	78
10	410	19A	35	117	75
11	372	174	36	114	72
12	341	155	37	111	6F
13	315	13B	38	108	6C
14	293	125	39	105	69
15	273	111	40	102	66
16	256	100	41	100	64
17	241	F1	42	98	62
18	228	E4	43	95	5F
19	216	D8	44	93	5D
20	205	CD	45	91	5B
21	195	C3	46	89	59
22	186	BA	47	87	57
23	178	B2	48	85	55
24	171	AB	49	84	54
25	164	A4	50	82	52

Z hlediska programového řešení se nabízí naprogramovat v MCU podobnou tabulku, kdy každé vstupní hodnotě z intervalu 1 až 50 náleží určitá výstupní hodnota, která je ve formě dat posílána na D/A převodník.

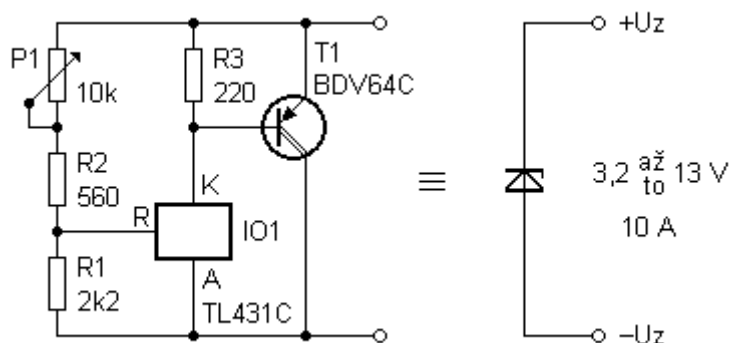
2.3 Režim konstantního napětí

V režimu konstantního napětí se elektronická zátěž snaží udržovat napětí na nastavené hodnotě bez ohledu na protékající proud. Často se používá též označení elektronická Zenerova dioda. Napěťová elektronická zátěž je vhodná pro zkoušení a oživování nabíječek akumulátorů, kdy umožňuje snadno simulovat napětí akumulátoru. Pokud je nastavené napětí vyšší než napětí na zátěži, proud neprotéká, jinak je proud dán vlastnostmi připojeného zdroje (I_{Z1} , I_{Z2}). Vlastnosti zátěže v napěťovém režimu jsou patrné z obr. 7.



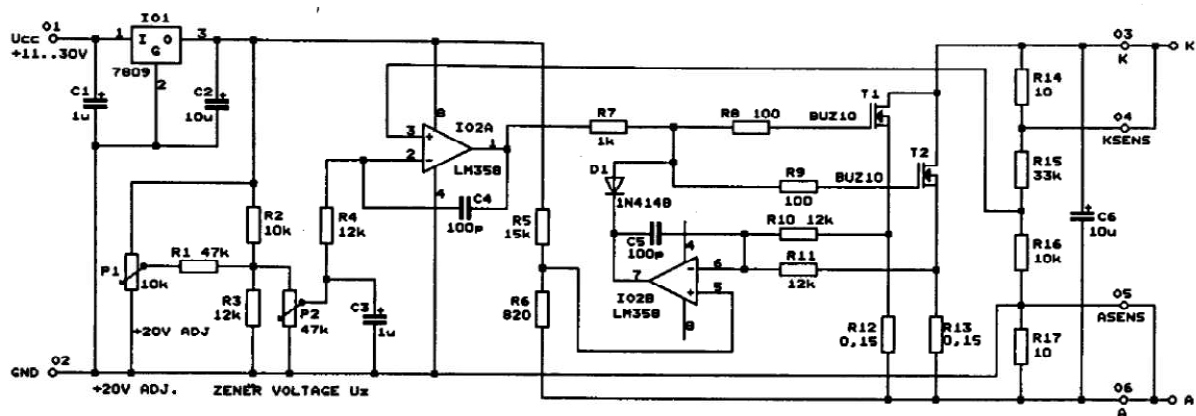
Obr. 7 Pracovní oblast elektronické zátěže v režimu konstantního napětí

Jedno z možných zapojení je na obr. 8, které přes svou jednoduchost dosahuje poměrně dobrých výsledků. To je dáno použitím obvodu TL431, který se chová jako přesná Zenerova dioda tak, aby mezi vývody R a A bylo udržováno napětí 2,5 V. Obvod nepotřebuje přídatné napájení, protože je napájen přímo ze zkoušeného zařízení. Zapojení je vyzkoušené, funguje spolehlivě, drobným nedostatkem je chybějící ochrana proti proudovému přetížení.



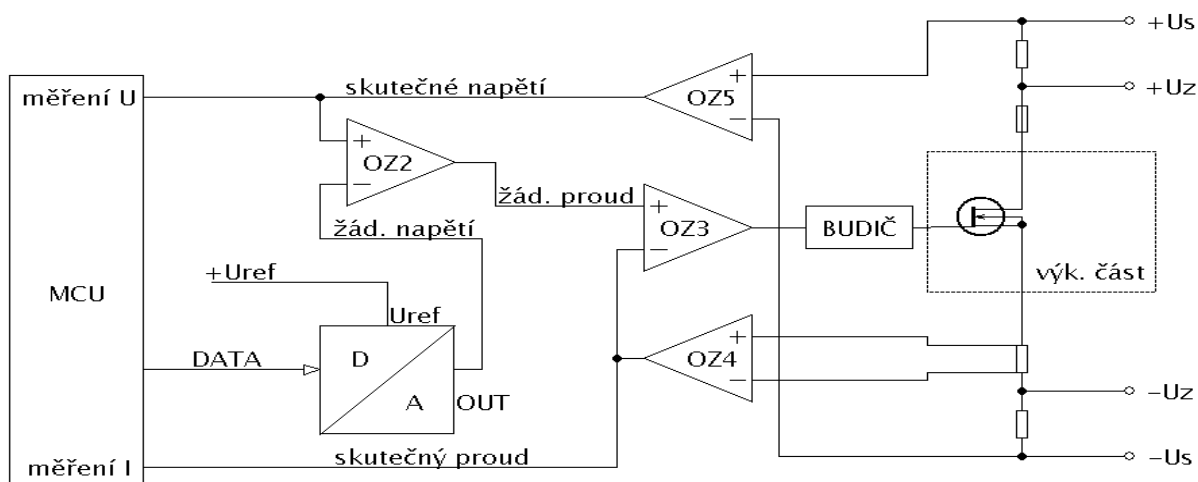
Obr. 8 Jednoduchá elektronická Zenerova dioda [3]

Uvedený nedostatek odstraňuje zapojení na obr. 9. Vlastní řízení zajišťuje OZ IO2A zapojený jako komparátor, na jehož neinvertující vstup je přivedeno skutečné napětí upravené děličem R15-R16 a na invertující vstup žádaná hodnota napětí z potenciometru P2 napájeného stálým napětím. Ochranu proti nadproudu tvoří snímací a vyrovnávací odpory R12 a R13, na nichž se vytváří úbytek napětí úměrný protékajícímu proudu. Ten je porovnáván s napětím z děliče R5-R6 a pokud je proud zátěží vyšší, OZ překllopí, na výstupu je nulové napětí a přes diodu D1 jsou přivírány tranzistory T1 a T2. Za zmínku stojí ještě samostatné svorky pro snímání napětí na zátěži (označené KSENS a ASENS), které umožňují samostatným vodičem měřit napětí přímo na připojeném zdroji a tak vyrušit vliv úbytku napětí na přívodních vodičích. Pokud svorky nejsou využity, mohou zůstat nezapojené, protože jsou přes malé odpory R14 a R17 spojené s hlavními svorkami. Popsaný způsob snímání napětí je používán i u některých průmyslových napájecích zdrojů.



Obr. 9 Složitější zapojení elektronické Zenerovy diody [4]

Na obr. 10 je blokové schéma elektronické zátěže řízené MCU, pracující v režimu konstantního napětí. Na výstupu D/A převodníku je žádaná hodnota napětí, kterou vysílá MCU. Ta je komparátorem OZ2 porovnávána s hodnotou skutečného napětí na zátěži. Pokud je žádané napětí vyšší než skutečné, OZ2 je v záporné saturaci, OZ3 také, výkonové tranzistory jsou zavřeny a zátěží neteče proud. Naopak, pokud napětí na zátěži dosáhne nastavenou hodnotu (případně je vyšší než nastavené), na výstupu OZ2 roste kladné napětí odpovídající žádanému proudu a proud roste tak, aby napětí na zátěži pokud možno nepřekročilo nastavenou hodnotu.



Obr. 10 Blokové schéma zátěže při řízení z MCU (režim U)

3. Návrh a popis zapojení elektronické zátěže

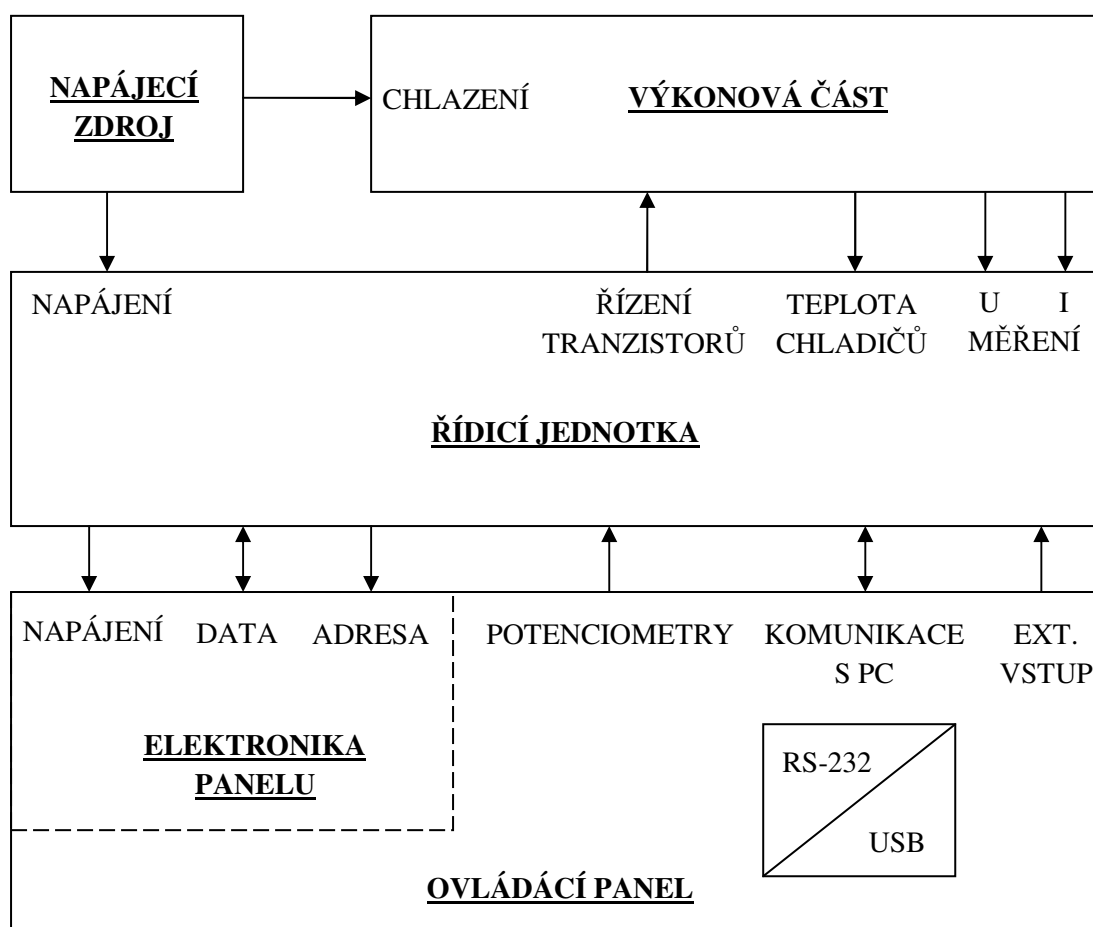
3.1 Celkový popis přístroje

Konstrukce přístroje vychází ze zapojení uvedeného v [18].

Zátěž se skládá z několika funkčních bloků:

- a) **napájecí zdroj** – je tvořen síťovým transformátorem a deskou zdroje. Obsahuje relé pro spínání ventilátorů a obvod hlídání správné činnosti zdroje.
- b) **řídící jednotka** – obsahuje řídicí mikropočítač a veškeré obvody pro řízení činnosti zátěže
- c) **elektronika panelu** – zprostředkovává připojení signalizačních LED diod a displejů a připojení ovládacích přepínačů a tlačítek. S ŘJ je propojena 8bitovou datovou a 3bitovou adresovou sběrnicí
- d) **výkonová část** – skládá se z výkonových tranzistorů na chladičích, proudového bočníku, silové pojistky a ventilátorů

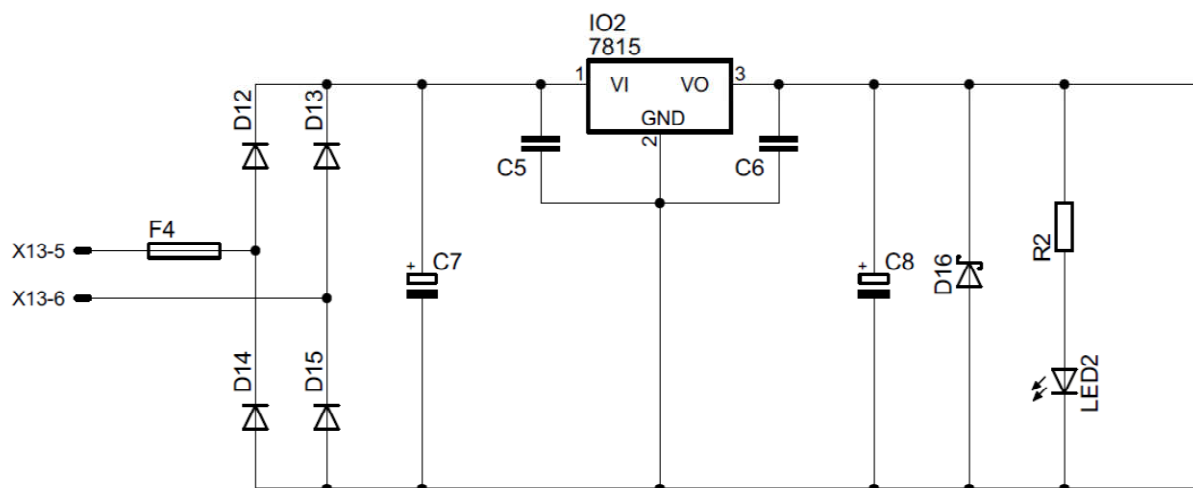
Na obr. 11 je zjednodušené blokové schéma přístroje. Podrobné propojení jednotlivých bloků přístroje je součástí dokumentace v příloze.



Obr. 11 Schéma propojení jednotlivých bloků přístroje

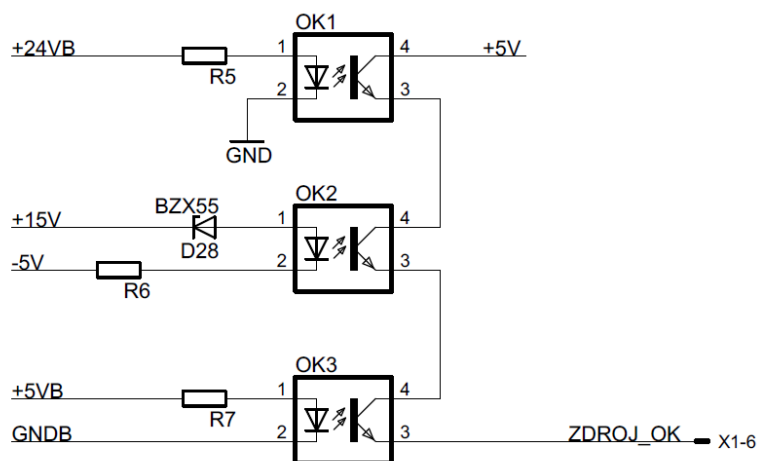
3.2 Napájecí zdroj

Blok napájecího zdroje, jehož celkové schéma zapojení je uvedeno v příloze, poskytuje napájecí napětí +5 V pro napájení MCU a logických obvodů, napětí +15 V a -5 V pro napájení OZ a napětí +24 V pro ventilátory. Tato napětí jsou vztažena ke společné zemi označené GND. Pro napájení převodníku sériového rozhraní RS-232 je k dispozici galvanicky oddělené napětí označené +5 V B vztažené proti zemi označené GND B. Zapojení jednotlivých větví stabilizovaného zdroje je shodné a je tvořeno základním zapojením stabilizátorů řady 78xx (viz obr. 12). Střídavé napětí ze sekundárního vinutí transformátoru přivedené konektorem X13 prochází přes pojistku F4, je usměrněno diodovým můstkem z diod D12 až D15 a vyfiltrováno kondenzátorem C7. Stabilizaci provádí obvod IO2, u něhož jsou zapojeny kondenzátory C5 a C6, které zlepšují stabilitu zapojení, zabraňují případnému kmitání a měly by být umístěny co nejbližně vlastního stabilizátoru. Na výstupu je opět malý filtrační kondenzátor C8 a ochranný transil D16, který v případě poruchy omezí napětí na výstupu na přijatelnou úroveň a po krátkém čase dojde k přetavení pojistky F4 v důsledku nadproudu (transil se chová jako výkonnější Zenerova dioda). Zapojení doplňuje signalizační LED2 s předřadným odporem R2. Pro každé napětí je na desce osazena LED dioda, takže v případě poruchy je možné snadno určit, které napájecí napětí chybí.



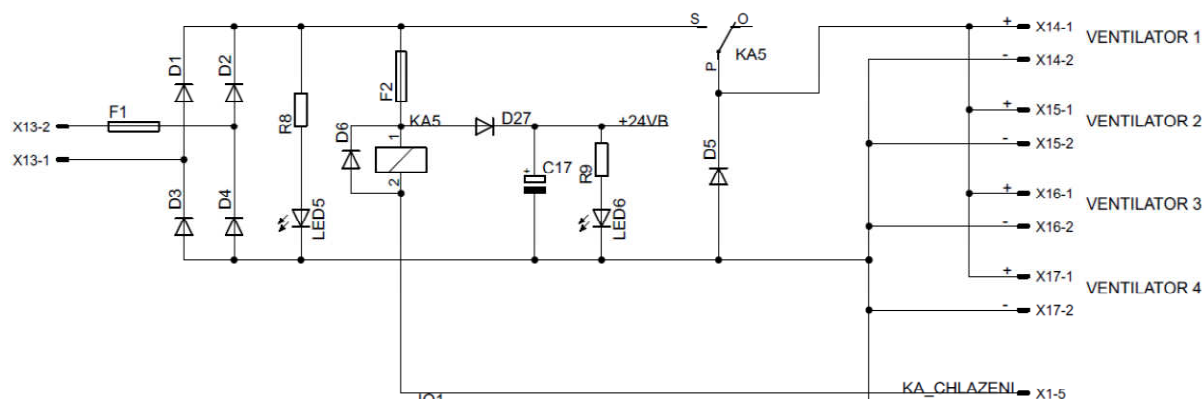
Obr. 12 Schéma zapojení jedné větve stabilizovaného zdroje

Pro činnost přístroje je důležitá přítomnost všech napájecích napětí. Proto je zdroj vybaven hlídacím obvodem, jehož zapojení je na obr. 13. Je složen ze 3 optočlenů spojených do série, za normálních podmínek jsou všechny sepnuty a na výstupu je +5 V (signál ZDROJ_OK). Při výpadku napětí +24 V se zavře optočlen OK1. Při výpadku některého z napětí +15 V a -5 V se zavře optočlen OK2 a při výpadku napětí +5 V B se zavře optočlen OK3. Konečně, při výpadku napětí +5V je signál opět nulový, protože nejsou napájeny výstupní tranzistory optočlenů. Signál ZDROJ_OK je zaveden do vstupu MCU, takže v případě poruchy zdroje je zablokována výkonová část.



Obr. 13 Obvod hlídání výstupních napětí zdroje

Na obr. 14 je zapojení zdroje +24 V pro napájení ventilátorů. Střídavé napětí z trafa (cca 25 V~) je pouze usměrněno, filtrace se neprovádí, protože jednak pro činnost ventilátorů není nutná a navíc při zapojení kondenzátoru by se zvýšila střední hodnota napětí (cca 33 V naprázdno), což je nežádoucí. Ventilátory jsou spínány kontaktem relé KA5 a na výstupu je ochranná dioda D5 zamezující vzniku napěťových špiček při vypínání ventilátorů (indukční zátěž), a tím zbytečnému opalování kontaktu relé. Hlídání napětí +24 V je zapojeno přes oddělovací diodu D27 a filtrační kondenzátor C17, takže optočlen OK1 zůstává zapnutý (napětí „nepadá k nule“).



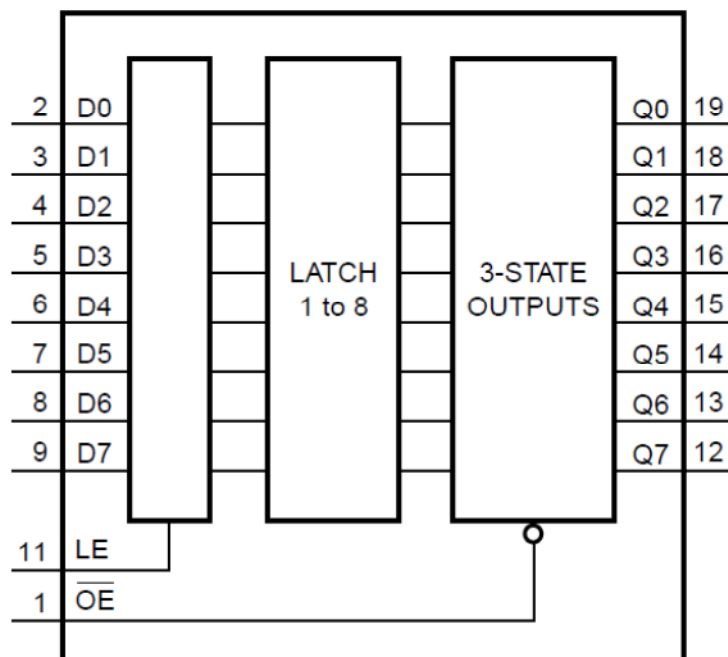
Obr. 14 Zapojení zdroje pro napájení ventilátorů

Modul zdroje je umístěn v levé přední části přístroje, transformátor i deska zdroje jsou upevněny šrouby k rámu přístrojové skříňky. Deska zdroje je přístupná po demontáži dolního krytu (výměna pojistek).

3.3 Elektronika panelu

Deska elektroniky panelu se skládá z řady 8bitových střadačů typu 74HC573. Anglicky se tento typ obvodů nazývá „D-type transparent latch“, protože se jedná o klopné obvody typu D řízené úrovní. Jak vyplývá z obr. 15, vývody D0-D7 jsou datové vstupy a Q0 až Q7 jsou datové výstupy. Vývody LE (*Latch Enable*) a /OE (*Output Enable*) slouží pro řízení činnosti obvodu.

<u>Význam řídicích signálů LE a /OE</u>		
LE	/OE	ČINNOST
0	0	na výstupu je hodnota uložená ve vnitřní paměti, vstupy neaktivní
1	0	na výstup se přenáší aktuální hodnota ze vstupů
0	1	výstupy odpojeny (stav Z), vstupy neaktivní
1	1	výstupy odpojeny (stav Z), stav vstupů se ukládá do vnitřní paměti



Obr. 15 Blokové schéma IO 74HC573 [5]

Celkové schéma zapojení je uvedeno v příloze. IO2 až IO7 jsou zapojeny jako výstupní brány, umožňují tedy přenášet data ze společné datové sběrnice na jednotlivé výstupy obvodů, a tak je možné ovládat signalizační LED diody a displeje. Pomocí vstupů LE se aktivuje obvod, který má převzít data ze sběrnice a poslat je na svůj výstup. Jednotlivé svítivé diody a segmenty displejů jsou připojeny přes odpory na výstupy obvodů (proud cca 8 mA).

Naopak IO8 je zapojen jako vstupní brána umožňující přenášet data ze svých vstupů na společnou datovou sběrnici. Připojení obvodu k datové sběrnici se provádí signálem /OE. Na vstupech IO8 jsou připojeny uzemňovací odpory R49-R56, které definují log. 0 v odpojeném stavu. Přepínače a tlačítka tedy spínají +5 V, takže přivádí log. 1. Otočný přepínač volby režimu SA1 je připojen přes jednoduchý převodník 1z5/BCD tvořený diodami D1 – D7, čímž se snižuje počet vstupů potřebných pro připojení přepínače. Jsou použity Schottkyho diody s malým úbytkem napětí v propustném směru.

Výběr obvodu připojeného k datové sběrnici se provádí prostřednictvím 3bitové adresy (AP0, AP1 a AP2) a signálu APZ potvrzujícího platnost adresy. Vlastní výběr provádí dekodér BCD/1z8 typu 74HC138. Protože aktivní výstup adresového dekodéru je v log. 0 (ostatní v log. 1), jsou některé výstupní signály invertovány hradly IO9A-F.

<u>Přiřazení adres panelu</u>				
APZ	AP2	AP1	AP0	k datové sběrnici připojeno
0	X	X	X	nic
1	0	0	0	nic (/Y0)
	0	0	1	IO2 – data pro displej LED1
	0	1	0	IO3 – data pro displej LED2
	0	1	1	IO4 – data pro displej LED3
	1	0	0	IO5 – data pro displej LED4
	1	0	1	IO6 – data pro svítivé diody LED5-8 a volba číslice displejů
	1	1	0	IO7 – data pro svítivé diody LED9-16
	1	1	1	IO8 – data z přepínačů a tlačítek

Při komunikaci s panelem je potřeba dodržet určitou posloupnost nastavení řídicích, datových a adresových signálů, aby bylo zaručeno, že načtení/vyčtení dat proběhne správně.

- 1) Vyčtení dat z panelu – jedná se o přečtení stavu tlačítek a přepínačů a přenos těchto dat z panelu do MCU. Nejdříve se datové vývody MCU nastaví jako vstupní, dále se vyšle adresa pro IO8 (tj. AP2, AP1, AP0 → log. 1). Poté se potvrdí platnost adresy (APZ → log. 1). Tím jsou výstupy IO8 připojeny k datové sběrnici a nyní je možné uložit data z IO8 do některé proměnné v MCU. Po uložení dat se vrátí APZ → log. 0 a datová sběrnice je volná.
- 2) Načtení dat do panelu – jedná se o nastavení některé skupiny LED diod nebo displejů. Např. pro ovládání skupiny svítivých diod LED9-16 bude postup následující: Nejdříve se datové vývody MCU nastaví jako výstupní a na sběrnici se vyšlou data pro danou skupinu. Poté se nastaví adresa (AP2, AP1 → log. 1; AP0 → log. 0), čímž se vybere obvod IO7. Následně se nastaví potvrzující signál (APZ → log. 1) a proběhne zápis dat do dané skupiny LEDek. Na konec se vrátí APZ → log. 0 a je možné poslat data do jiné skupiny.

Displeje LED1 – LED4 pracují v multiplexním režimu (v každém okamžiku tedy svítí pouze 1 číslice na každém displeji, přičemž jejich přepínání je natolik rychlé, že je okem nepostřehnutelné). Společné katody jednotlivých displejů jsou spojeny tak, že v daném okamžiku svítí na všech displejích číslice stejného řádu.

Celý cyklus zápisu dat na displeje je následující:

- 1) Připojení IO6, vypnutí T1 – T4 (displeje zhasnuté)
- 2) Připojení IO2, zápis dat pro 1. číslici displeje LED1
- 3) Připojení IO3, zápis dat pro 1. číslici displeje LED2
- 4) Připojení IO4, zápis dat pro 1. číslici displeje LED3
- 5) Připojení IO5, zápis dat pro 1. číslici displeje LED4
- 6) Připojení IO6, zapnutí T1
- 7) ...pauza...(svítí 1. číslice na displejích)
- 8) Připojení IO6, vypnutí T1 – T4 (displeje zhasnuté)
- 9) Připojení IO2, zápis dat pro 2. číslici displeje LED1
- 10) Připojení IO3, zápis dat pro 2. číslici displeje LED2
- 11) Připojení IO4, zápis dat pro 2. číslici displeje LED3
- 12) Připojení IO5, zápis dat pro 2. číslici displeje LED4

- 13) Připojení IO6, zapnutí T2
- 14) ...pauza...(svítí 2. číslice na displejích)
- 15) Připojení IO6, vypnutí T1 – T4 (displeje zhasnuté)
- 16) Připojení IO2, zápis dat pro 3. číslici displeje LED1
- 17) Připojení IO3, zápis dat pro 3. číslici displeje LED2
- 18) Připojení IO4, zápis dat pro 3. číslici displeje LED3
- 19) Připojení IO5, zápis dat pro 3. číslici displeje LED4
- 20) Připojení IO6, zapnutí T3
- 21) ...pauza...(svítí 3. číslice na displejích)
- 22) Připojení IO6, vypnutí T1 – T4 (displeje zhasnuté)
- 23) Připojení IO2, zápis dat pro 4. číslici displeje LED1
- 24) Připojení IO3, zápis dat pro 4. číslici displeje LED2
- 25) Připojení IO4, zápis dat pro 4. číslici displeje LED3
- 26) Připojení IO5, zápis dat pro 4. číslici displeje LED4
- 27) Připojení IO6, zapnutí T4
- 28) ...pauza...(svítí 4. číslice na displejích)
- 29) znovu od 1)

3.4 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka, jejíž celé schéma zapojení je v příloze, je tvořena řídicím mikropočítačem, integrovaným D/A převodníkem, zdrojem referenčního napětí, obvody pro komunikaci s PC, obvody pro měření napětí a proudu, obvody pro řízení tranzistorů a budičem výkonových tranzistorů.

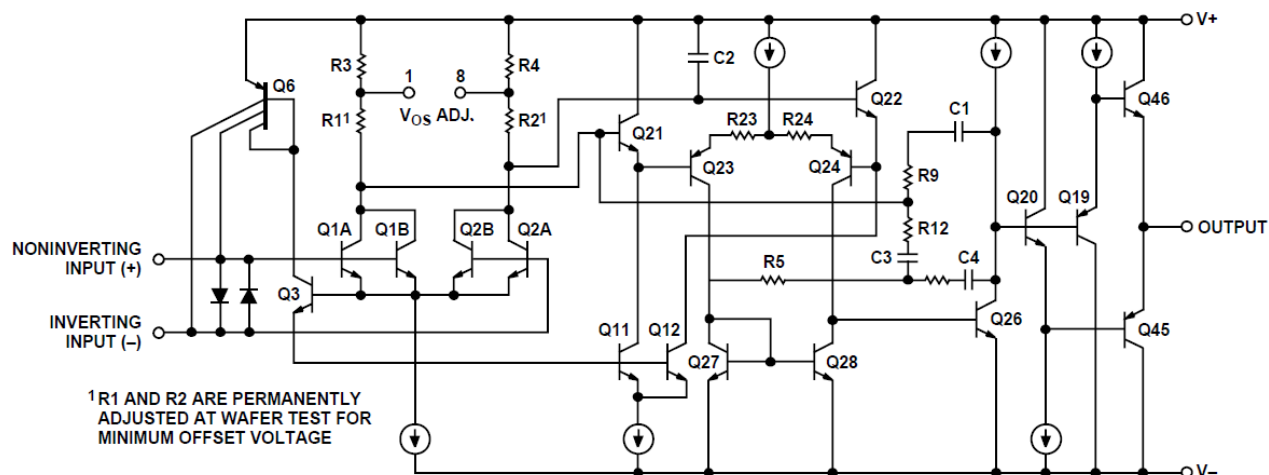
Hlavní částí jednotky je mikropočítač IO1 typu Atmel ATMega16, což je 8bitový mikropočítač s max. taktovacím kmitočtem 16 MHz a 16 kB programové paměti typu Flash. Zde pracuje MCU s nižším kmitočtem daným krystalem Q1 ($4\,194\,304 = 2^{22}$ Hz). Kondenzátory C1, C2 tvoří součást hodinového oscilátoru [6]. MCU je vybaven čtveřicí 8bitových portů, které mohou mít buď obyčejnou funkci vstupu/výstupu, nebo mohou být využity pro některou z vestavěných periférií MCU (ADC, SPI, USART). Napájení analogové části MCU, D/A převodníku a zdroje referenčního napětí je odděleno tlumivkou L1. Zdroj referenčního napětí je tvořen integrovaným obvodem IO3 typu MCP1541 v základním zapojení [7]. Referenční napětí o hodnotě 4,096 V je výhodné, protože $4096=2^{12}$, takže při 12bitovém rozlišení (D/A převodník) odpovídá 1 krok hodnotě 1 mV, resp. při 10bit rozlišení (A/D převodník) hodnotě 4 mV. Z referenčního napětí je přes sledovač OZ1A vyvedeno napájecí napětí pro potenciometry na panelu a pro termistory na chladičích a přes sledovač OZ1B pro napájení externího napěťového vstupu. Pracovní napětí na vstupech vestavěného A/D převodníku se může pohybovat v rozsahu 0 až 4,095 V, může být i trochu vyšší (pak už převodník pochopitelně nepřevádí), ale v žádném případě by nemělo překročit hodnotu napájecího napětí 5 V. Proto jsou na těch vstupech, kde by teoreticky mohlo dojít k výskytu vyššího napětí zapojeny ochranné diody s malým úbytkem (D4, D5, D8-11).

Struktura zapojení řídicí části vychází ze základních blokových schémat uvedených v kap. 2 (obr. 4, 6, 10). Přepínání mezi jednotlivými režimy se provádí pomocí kontaktů signálových relé KA1 a KA2. Kontakty jsou kresleny v klidové poloze. V proudovém režimu jsou oba kontakty v klidové poloze, v odporovém režimu přepíná KA1 a v napěťovém režimu přepíná KA2. Kontakt relé KA3 odděluje vstup komparátoru OZ3. Pokud je KA3 rozepnut, vstup je přes odpor R27 připojen na zem a žádaná hodnota proudu je tedy nulová. Relé KA3 se uplatňuje při přepínání režimů zátěže, kdy by jinak docházelo ke krátkým proudovým špičkám. Při přepínání režimu tedy nejdříve rozepne KA3, pak dojde s určitým zpožděním k přestavení KA1, KA2 a nakonec opět s určitým zpožděním sepne KA3. Relé jsou ovládána z výstupů MCU přes tranzistory T1 – T3, paralelně k cívkám relé jsou zapojeny ochranné diody D1 – D3.

Napětí na zátěži je přivedeno přes konektor X10 na rozdílový zesilovač OZ5 se zesílením 0,1 - tedy vstupnímu napětí 0-40 V odpovídá výstupní napětí 0-4 V. Podobně proud je měřen jako úbytek napětí na bočníku (Metra 150 mV/60 A/0,5%) rozdílovým zesilovačem OZ4 se zesílením 40. Proudů 0-40 A odpovídá napětí na bočníku 0-100mV a výstupní napětí OZ4 je tedy 0-4 V. OZ3 pracuje jako komparátor proudu, na jeho neinvertující vstup je přivedena žádaná hodnota proudu a na neinvertující vstup skutečná hodnota proudu z rozdílového zesilovače OZ4. Výstup OZ3 je posílen tranzistory T5, T6 a přes omezovací odpory R33-38 napájí řídicí elektrody výkonových tranzistorů. Kontakt relé KA4 blokuje výstupní tranzistory při poklesu napájecího napětí, jinak při vypínání celého přístroje docházelo ke krátkému neřízenému otevření výstupních tranzistorů. Výsledkem byla cca 250ms proudová špička, která při dostatečně dimenzovaném připojeném zdroji přesahovala 60 A. Po vypnutí přístroje, kdy napájecí napětí začínají postupně padat, s dostatečným předstihem odpadne relé KA4 a výstupní tranzistory se přes odpor R10 zavřou. Konečně OZ2 plní funkci komparátoru žádaného a skutečného napětí, signál z jeho výstupu udává žádaný proud, pokud zátěž pracuje v napěťovém režimu.

Na místech OZ2-OZ5 jsou použity přesné operační zesilovače OP27 s velmi nízkým offsetem (30 μ V) [8]. Při malém napětí, resp. proudu se pracuje se signály v řádech mV, takže není možné použít obyčejné OZ (např. TL071 má offset až 10 mV). OZ mají vestavěné antiparalelně zapojené diody mezi vstupy (obr. 16), takže je nutné použít předřadné odpory (R49, 50, 25, 26), aby při větším rozdílu napětí mezi vstupy nedocházelo k přetížení a ovlivňování ostatních obvodů. Při použití OZ v lineární oblasti (invertující, neinvertující, součtový, rozdílový zesilovač) se tyto diody neuplatňují, protože v těchto zapojeních OZ už z principu udržuje minimální rozdíl napětí mezi svými vstupy.

Propojení země řídicí elektroniky se zemí výkonového bloku (emitory tranzistorů), je provedeno přes dvojitou svorkovnici X8. Zde je též připojeno stínění kabelu od proudového bočníku.



Obr. 16 Vnitřní zapojení OZ OP27 [8]

A/D převodník vestavěný v MCU může zpracovávat signál až z 8 kanálů (vstupy ADC0 – ADC7). Ale protože je převodník schopen v daném okamžiku převádět signál pouze z 1 kanálu, vstupy jsou vedeny přes analogový multiplexer. V tomto případě zpracování jednotlivých vstupních signálů s určitým časovým odstupem není na závadu, protože se jedná v podstatě o stejnosměrné a pomalu se měnící veličiny.

Na vstup ADC0 je přes filtr R48-C28 s ochrannými diodami D10, D11 připojen signál z OZ5 odpovídající skutečnému napětí na zátěži. Na vstup ADC1 je přes filtr R47-C29 s ochrannými diodami D8, D9 připojen signál z OZ4 odpovídající skutečnému proudu zátěží.

Na vstupy ADC2, 3, 4 jsou připojeny signály z potenciometrů na ovládacím panelu. Ty jsou napájeny referenčním napětím, takže ochranné diody nejsou nutné. Vstupy jsou vybaveny RC filtry (R12-C5, R15-C6, R18-C7) pro odstranění šelestu potenciometrů. Odpory R11, R14 a R17 zajišťují uzemnění vstupu v případě odpojení potenciometru, kdy se vlivem vysokého vstupního odporu A/D převodníku (100 MΩ) může na tento vstup naindukovat nežádoucí rušivé napětí.

Na vstupy ADC5, 6 jsou připojena napětí z termistorů upevněných na chladičích výkonových tranzistorů. Jsou použity perličkové termistory typu NTC se jmenovitým odporem $R_0 = 4,7 \text{ k}\Omega$ (při 25°C) a teplotním součinitelem $B = 3470 \text{ K}$.

Pro výsledný odpor termistoru při určité teplotě platí přibližně vztah: $R = R_0 \cdot e^{-B \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$, kde:

R ...odpor termistoru při dané teplotě T [Ω]

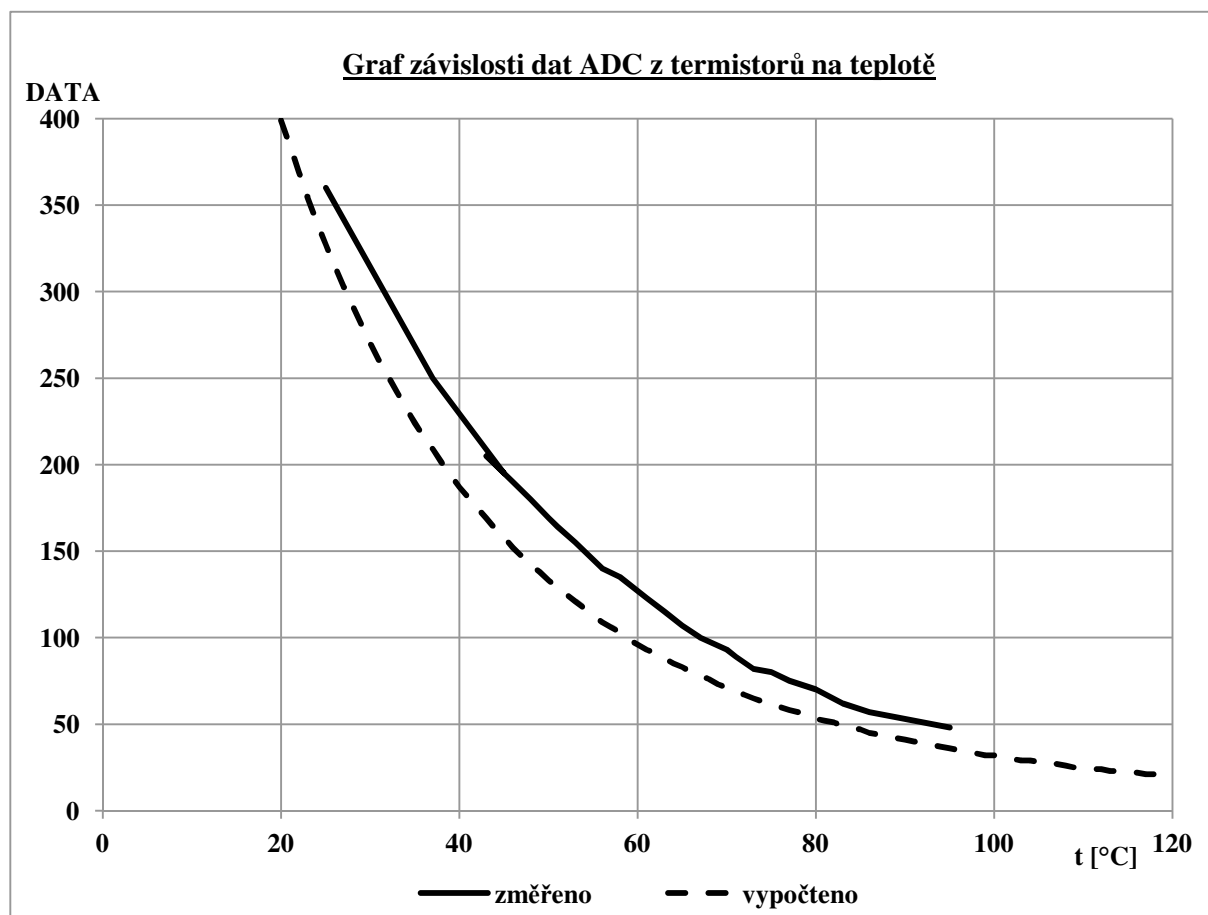
R_0 ...odpor termistoru při vztažné teplotě T_0 [Ω]

B ...teplotní součinitel

T_0 ...vztažná teplota [K]

T ...daná teplota [K]

Pro zajímavost bylo provedeno měření charakteristiky termistoru ponořeného do vody, kde byla skutečná teplota měřena laboratorním rtuťovým teploměrem a napětí z termistoru bylo zpracováno A/D převodníkem v MCU. Výsledek je zobrazen v grafu přímo ve formě dat, které odpovídají naměřenému napětí (DATA 0-1023 odpovídají napětí 0-4,095 V). Hodnoty z termistorů jsou použity pro zapínání ventilátorů, případně pro vypnutí zátěže při přehřátí.



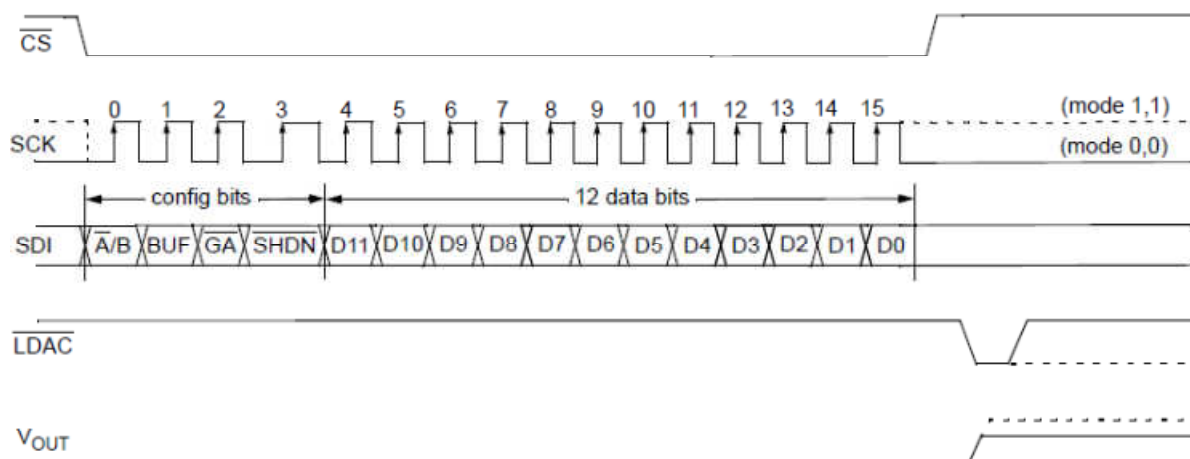
Vstup ADC7 je použit pro připojení vnějšího napětí v rozsahu 0-4,095 V, které je možné vyhodnocovat obslužným programem v PC společně s ostatními měřenými veličinami. Vstup může být použit např. pro teplotní sondu snímající teplotu výkonové části testovaného zdroje. Vstup je vyveden na dvouřadý konektor CANON 15, kde je vyvedeno rovněž referenční napětí 4,096 V a střídavé napětí 19 V~ ze síťového transformátoru pro případné napájení připojeného měřicího převodníku. Toto napětí je jištěno tavnou pojistkou F200mA umístěnou u síťového transformátoru, která je přístupná po demontáži horního krytu přístroje.

Pro získání analogového napětí z MCU je použit 12bitový D/A převodník IO2 typu MCP4921, který je s MCU propojen pomocí sériového rozhraní SPI. Toto rozhraní je rovněž vyvedeno na programovací konektor JP1, takže je možné MCU programovat přímo v zapojení (ICSP). SPI rozhraní je určeno pro synchronní sériovou komunikaci typu Master-Slave. Při komunikaci MCU→DAC je MCU řídicí a DAC podřízené zařízení. Při programování je MCU podřízené a PC řídicí zařízení.

Řídicí slovo pro D/A převodník je celkem 16bitové, přičemž první 4 bity jsou nastavovací a dalších 12 bitů obsahuje data [9]. Pro vstup dat je určen vývod SDI *Serial Data Input* (pin 4), synchronizační signál je přiveden na vývod SCK *Serial Clock* (pin 3). Vývod /CS *ChipSelect* (pin 2) slouží pro výběr obvodu (k SPI sběrnici může být připojeno více obvodů současně, přičemž vždy je aktivní pouze 1). Vývod /LDAC *Latch DAC Input* (pin 5) slouží pro přesun přijatého řídicího slova ze vstupního registru do pracovního registru D/A převodníku. Na obr. 17 jsou zobrazeny průběhy řídicích signálů. Čtení stavu řídicích bitů probíhá při náběžné hraně synchronizačního signálu.

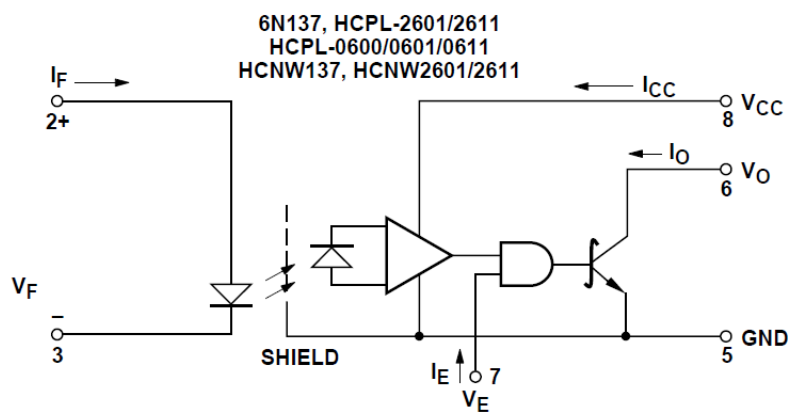
Význam jednotlivých řídicích bitů:

- $\overline{A/B}$ - volba D/A převodníku (má význam pouze u dvojitého převodníku MCP4922). Zde je stále v log. 0.
- BUF - zapnutí sledovače na vstupu referenčního napětí (vyšší vstupní odpor, omezený napěťový rozsah). Zde může zůstat trvale v log. 0.
- \overline{GA} - zesílení výstupního zesilovače (2x při log. 0; 1x při log. 1). Zde je požadováno jednotkové zesílení, takže se stále posílá log. 1.
- \overline{SHDN} - vypnutí převodníku (při log. 0 je výstup ve stavu vysoké impedance). Zde je obvod stále zapnutý, takže se stále posílá log. 1.
- D11..D0 - datové bity (D11 nejvyšší bit, D0 nejnižší bit)



Obr. 17 Průběhy signálů při řízení D/A převodníku

Komunikace s PC je zajištěna pomocí rozhraní USART vestavěného v MCU, které umožňuje obousměrnou synchronní nebo asynchronní sériovou komunikaci. MCU má oddělený registr pro příjem a vysílání dat, takže umožňuje tzv. plně duplexní komunikaci (ve stejné chvíli mohou data proudit oběma směry). Protože MCU má komunikovat s PC přes sériové rozhraní RS-232, případně USB, je použit asynchronní režim, kdy má každé zařízení svůj zdroj synchronizačního signálu pracující na přibližně stejném kmitočtu a synchronizace je odvozena od počátečního start bitu. Signály z USARTu TxD a RxD mají běžné logické úrovně (0 a 5 V) a jsou vedeny na obvod IO4 typu MAX232, což je převodník RS232↔TTL. Mezi převodníkem a MCU jsou zapojeny optočleny OK1, 2 zajišťující galvanické oddělení PC a zátěže. Optočleny mají výstup s otevřeným kolektorem typu NPN (viz obr. 18), takže je nutné použití „pull-up“ odporů R13, R16.

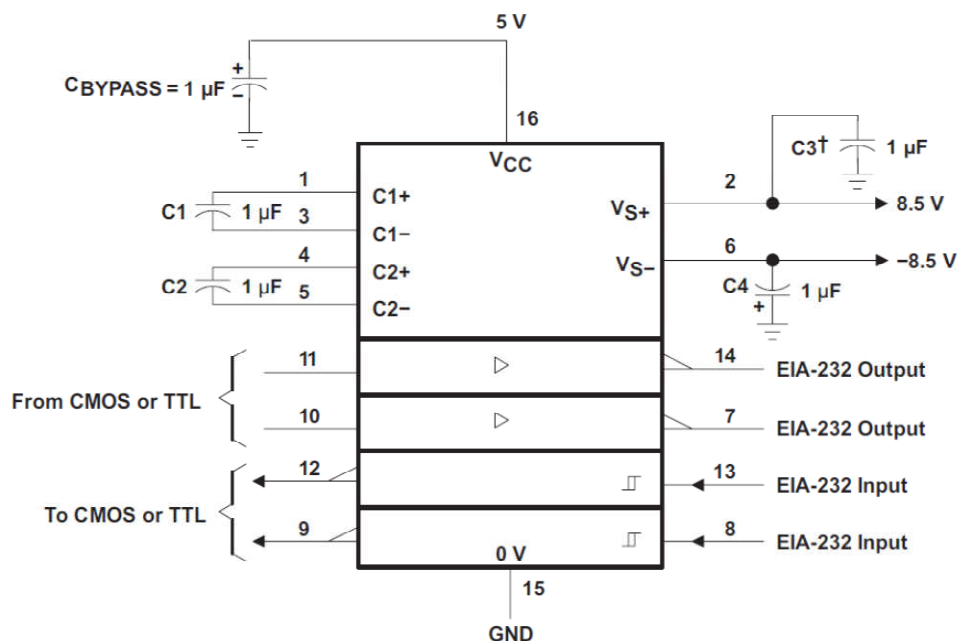


Obr. 18 Vnitřní zapojení optočlenu 6N137 [10]

Převodník IO4 spolu s připojenými kondenzátory pracuje jako nábojová pumpa a vytváří potřebné napěťové úrovně pro komunikační linku RS-232. Zapojení je standardní (obr. 19), jsou použity tantalové kondenzátory (jak je doporučeno v katalogovém listu).

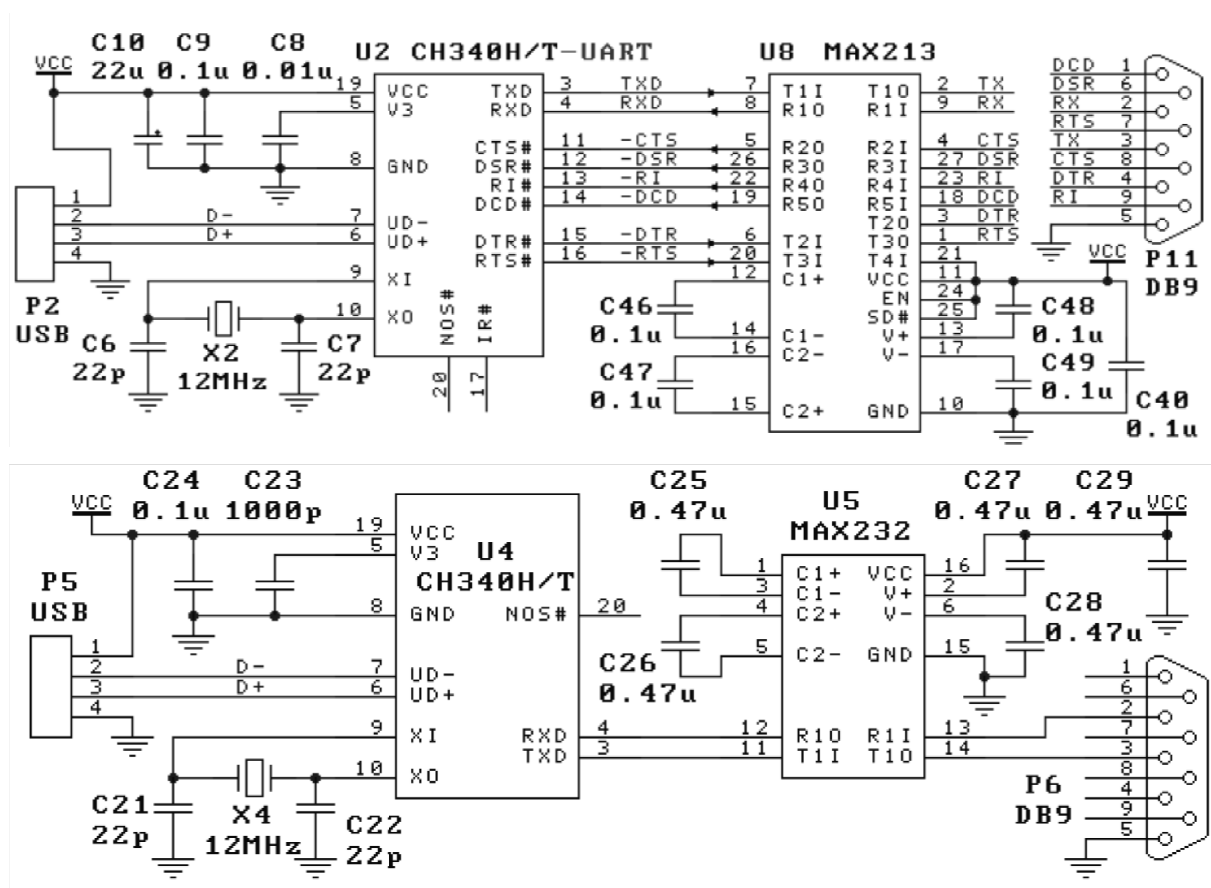
Tabulka log. úrovní rozhraní RS-232 [11]

Úroveň	Vysílač	Přijímač
Log. L	+5 V to +15 V	+3 V to +25 V
Log. H	-5 V to -15 V	-3 V to -25 V
Nedefinovaný	-3 V to +3 V	



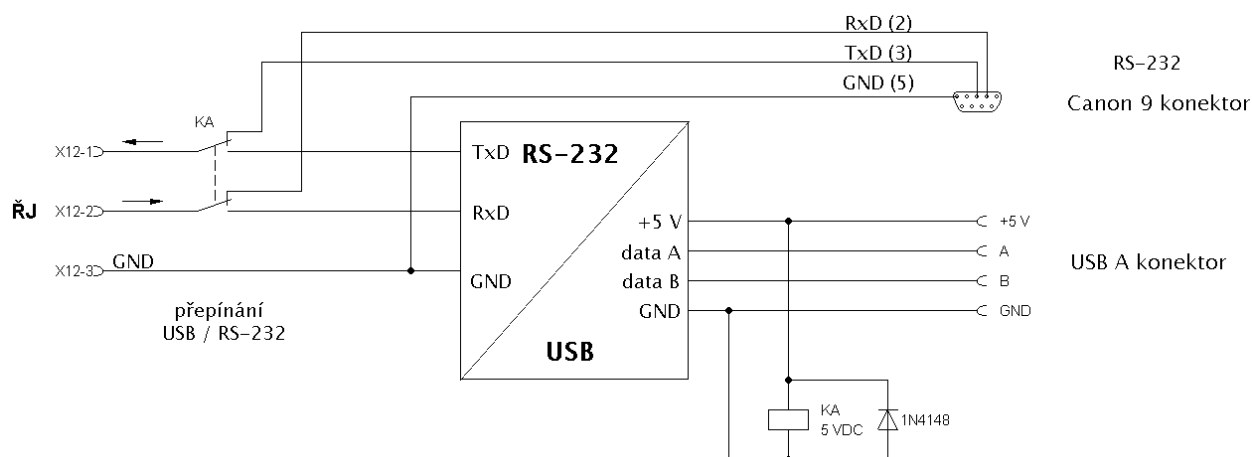
Obr. 19 Základní zapojení obvodu MAX232 [12]

O převod z rozhraní RS232 na USB se stará modul s integrovaným obvodem CH340 zapojený přibližně podle obr. 20. Z obvodu jsou vyvedeny všechny signály rozhraní RS232, nicméně v daném případě jsou využity pouze signály RxD a TxD. Obvod CH340 je v podstatě naprogramovaný mikro počítač vybavený rozhraním UART, takže pro převod na napěťové úrovně rozhraní RS232 je opět využit druhý obvod (MAX232, případně vícekanálový MAX213). Hotový modul převodníku lze koupit za velmi přijatelnou cenu (cca 100 Kč). Na desce modulu jsou indikační svítivé diody „RxD“ a „TxD“ indikující přenos dat.



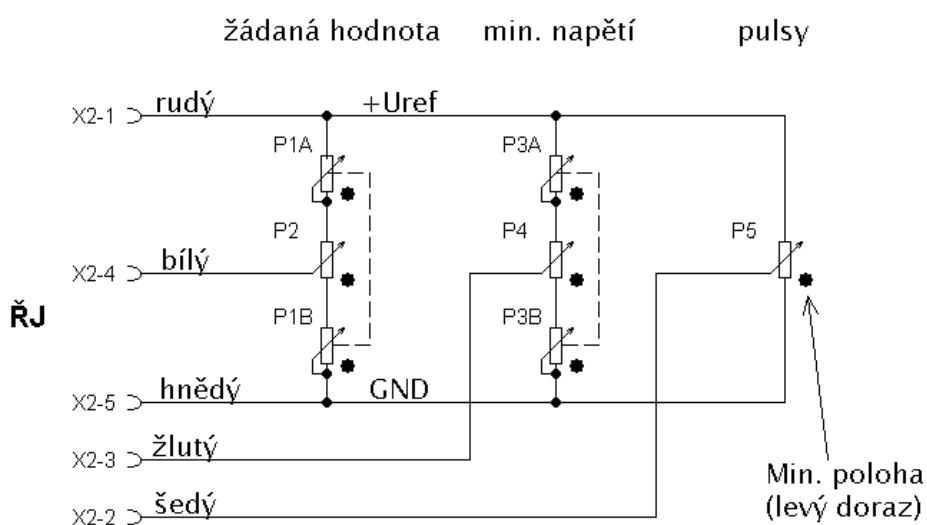
Obr. 20 Schémata zapojení převodníku USB↔RS232 s obvodem CH340 [13]

Komunikační rozhraní použité pro spojení s PC se přepíná pomocným signálovým relé KA umístěným u převodníku dle zapojení na obr. 21. Dioda připojená k cínce relé odstraňuje napěťovou špičku při vypínání relé. Pokud je připojeno PC přes rozhraní RS232 a konektor USB není zapojen, kontakty relé jsou v klidové poloze a převodník je odpojen. Pokud se připojí PC přes rozhraní USB, dojde k přitažení relé KA v důsledku přivedení napájecího napětí +5 V z PC, které zároveň napájí převodník. Kontakty relé pak připojí převodník k datovým vývodům řídicí jednotky zátěže. Pokud by bylo současně připojeno USB i RS232, má USB vyšší prioritu. Z hlediska nastavení v PC se USB převodník tváří jako další sériový port (např. COM6), samozřejmě po nainstalování nezbytných ovladačů zařízení.



Obr. 21 Obvod přepínání komunikačního rozhraní

Pro úplnost je na obr. 22 schéma propojení potenciometrů umístěných na ovládacím panelu. Pro nastavení žádané hodnoty $U/I/R$ a hranice minimálního napětí je použita dvojice potenciometrů umožňujících hrubě a jemné nastavení. Potenciometry P2 a P4 slouží pro hrubé nastavení a tandemové potenciometry P1 a P3 pro jemné doladění. Při nastavení hrubého potenciometru P2 (P4) na minimum se pro jemné nastavení uplatňuje P1B (P3B). Naopak při nastavení v okolí maxima se uplatňuje P1A (P3A).

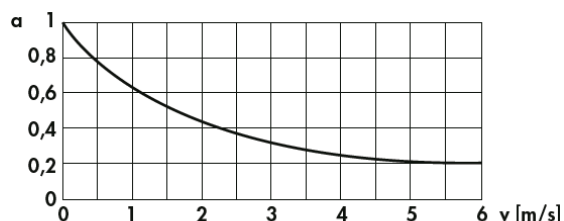


Obr. 22 Schéma zapojení potenciometrů na ovládacím panelu

Postup při určení součinitele a při nuceném chlazení [14]

Tepelné odpory libovolného profilu při zesíleném chlazení

$R_{thKf} \approx a \cdot R_{thK}$
 R_{thKf} = tepelný odpor požadovaného chlazení
 R_{thK} = tepelný odpor - přirozené chlazení
 a = proporcionální faktor



Poznámky:

1. Hodnoty zadane v našem diagramu platí pro chladič s černě eloxovaným povrchem ve vertikální poloze s volnou konvekcí.

Korekční faktory: Pro přírodně barvené povrchy +10 až 15 %. Pro horizontální polohu +15 až 20 %

Při maximálním ztrátovém výkonu 400 W vzniká na každém tranzistoru ztrátový výkon $400/12 = 34$ W. Z parametrů tranzistoru ($P_D = 190$ W při $t_j = 25^\circ\text{C}$ a $P_D = 0$ W při $t_{j\max} = 150^\circ\text{C}$) vyplývá, že při ztrátovém výkonu 34 W je max. teplota přechodu cca 125°C . Při následujících výpočtech je počítáno s použitím slídové izolační podložky s poměrně vysokým tepelným odporem ($0,8^\circ\text{C/W}$).

Přestup tepla přechod \rightarrow pouzdro: $R_{th(j-c)} = 0,65^\circ\text{C/W} \Rightarrow \Delta t_{j-c} = R_{th(j-c)} \cdot P_D = 0,65 \cdot 34 = \underline{\underline{22^\circ\text{C}}}$

Přestup tepla pouzdro \rightarrow chladič: $R_{th(c-h)} = 0,8^\circ\text{C/W} \Rightarrow \Delta t_{c-h} = R_{th(c-h)} \cdot P_D = 0,8 \cdot 34 = \underline{\underline{27^\circ\text{C}}}$

Přestup tepla chladič \rightarrow vzduch: $R_{th(h-a)} = 0,63^\circ\text{C/W} \Rightarrow \Delta t_{h-a} = R_{th(h-a)} \cdot P_D = 0,63 \cdot 34 = \underline{\underline{22^\circ\text{C}}}$

Při max. teplotě přechodu $t_j = 125^\circ\text{C}$ pak vychází:

- max. teplota pouzdra: $t_c = t_j - \Delta t_{j-c} = 125 - 22 = \underline{\underline{103^\circ\text{C}}}$
- max. teplota chladiče: $t_h = t_c - \Delta t_{c-h} = 103 - 27 = \underline{\underline{76^\circ\text{C}}}$
- max. teplota vzduchu: $t_a = t_h - \Delta t_{h-a} = 76 - 22 = \underline{\underline{54^\circ\text{C}}}$

Z uvedených výpočtů vyplývá, že výkonové tranzistory jsou chlazeny dostatečně i při nejvyšším uvažovaném celkovém ztrátovém výkonu 400 W. Při praktických zkouškách bylo zjištěno, že teplota chladiče i po několikahodinovém provozu při max. ztrátovém výkonu nepřekročí 45°C .

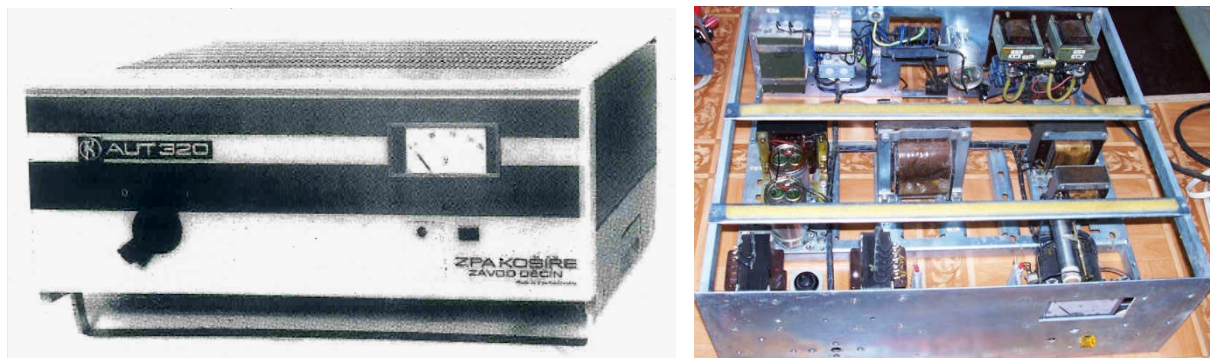
Protože tranzistory jsou propojeny paralelně, je u každého z nich zapojen odpor $0,1\ \Omega/2$ W pro vyrovnání proudu procházejícího jednotlivými tranzistory. V katalogových listech výkonových unipolárních tranzistorů se běžně uvádí, že jsou vhodné pro paralelní provoz, protože na rozdíl od bipolárních tranzistorů se s rostoucí teplotou zvyšuje napětí U_{DS} , takže by měl klesat proud a fungovat jakási samoregulace. Nicméně při pokusech bez vyrovnávacích odporů byly rozdíly v jednotlivých proudech takové, že tranzistor, kterým tekla delší dobu nejvyšší proud, se prorazil.

Proud je snímán bočníkem Metra $150\text{ mV}/60\text{ A}$ s přesností 0,5 %, který byl původně součástí příslušenství dnes již historických ručičkových přístrojů bakelitového provedení (DU 10).

V silovém obvodu je zapojena také pojistka pro případ, že by došlo k proražení tranzistoru, případně jiné závadě, která by způsobila nekontrolovaný nárůst odebíraného proudu. K tomu by mohlo dojít při připojení zdroje schopného dodat vysoký zkratový proud (např. automobilový olověný akumulátor). Použitá pojistka je typu OEZ P50K06 50 A gR, jedná se tedy o pojistku určenou k jistění polovodičů proti přetížení i zkratu [15].

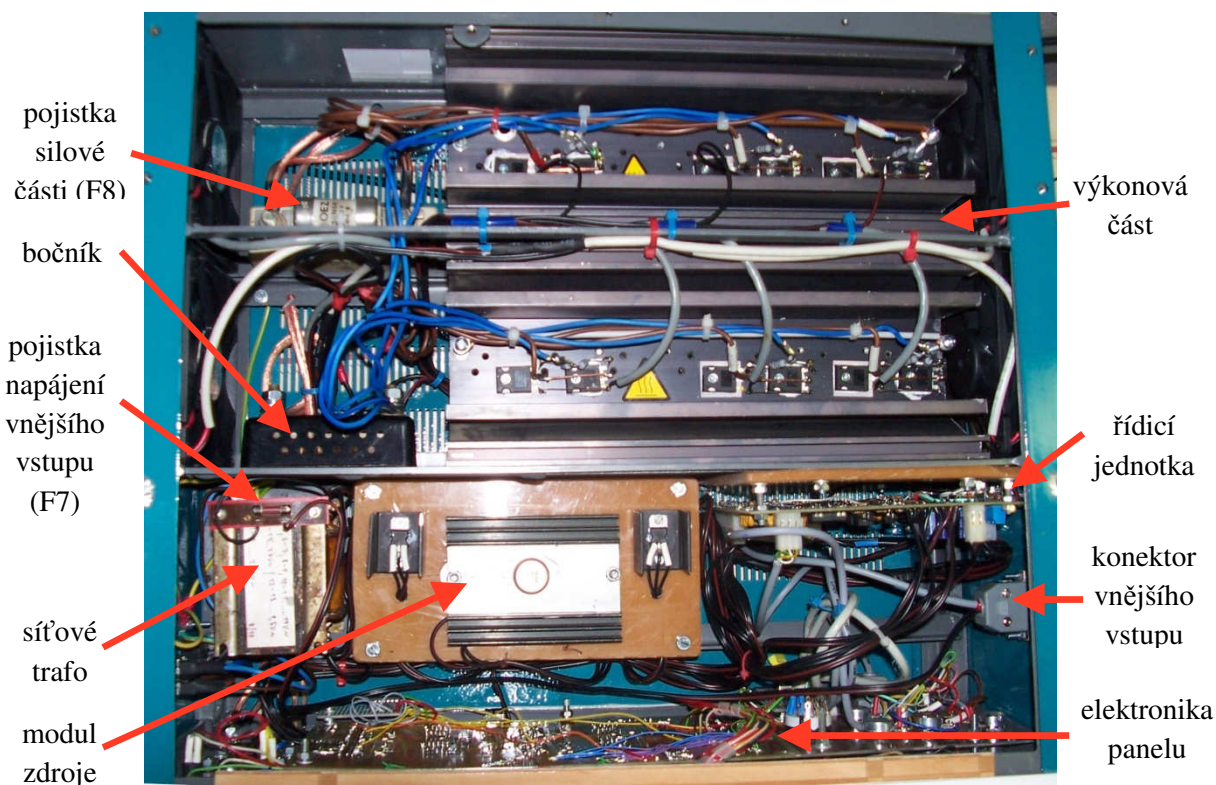
3.6 Mechanická konstrukce přístroje

Přístroj je vestavěn ve skříňce sestávající z nosného rámu ze svařených kovových profilů a krycích plechů. Přístrojová skříňka pochází ze stabilizátoru síťového napětí ZPA AUT-305 [17] (obr. 24).

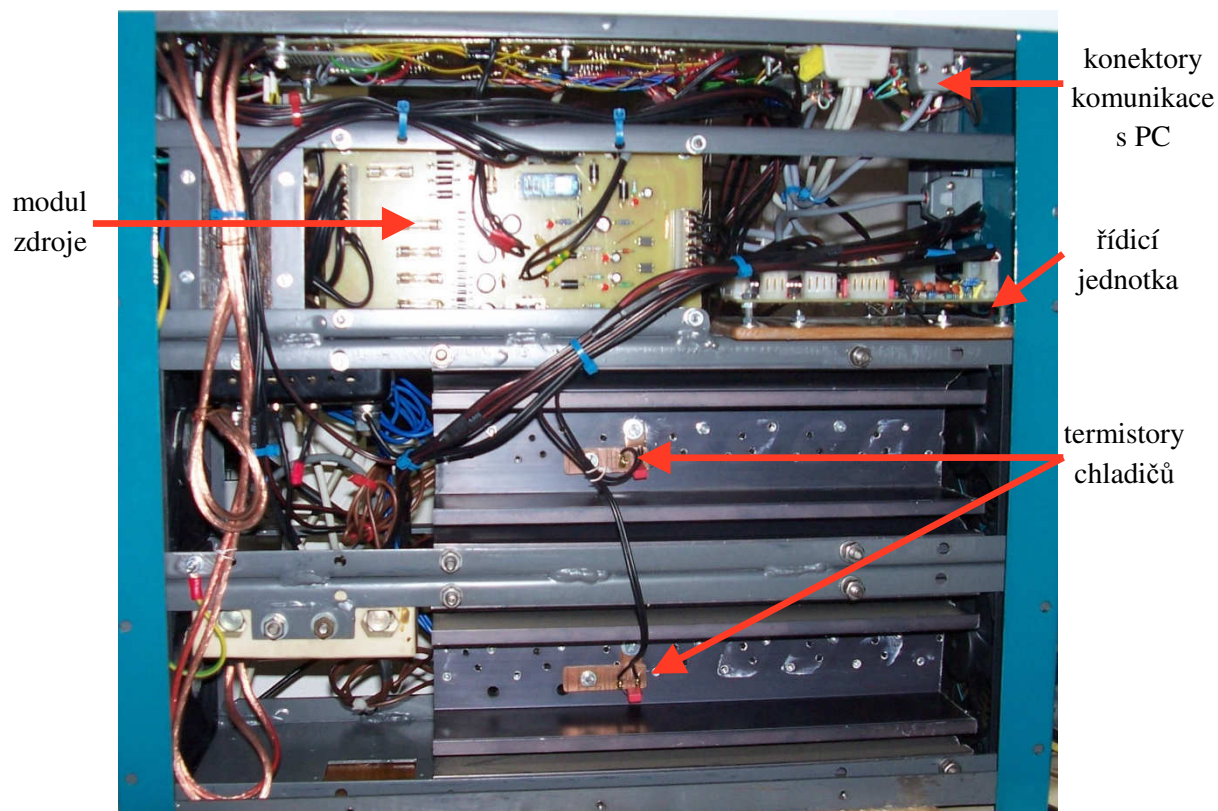


Obr. 24 Původní provedení přístrojové skříňky

Přístup k jednotlivým částem přístroje je možný po demontáži horního a dolního krycího plechu, které jsou připevněny k nosnému rámu skříňky šrouby M4 se zapuštěnou hlavou a čalounickými podložkami. Dále je možné po vyšroubování bočních šroubů demontovat boční krycí plechy, což je potřeba např. při výměně ventilátorů. Rozmístění součástí je patrné z obr. 25 a 26. Na dolní a zadní straně skříňky jsou přišroubovány masivní gumové nožky, takže přístroj může stát ve vodorovné i svislé poloze.



Obr. 25 Pohled do útrob přístroje z horní strany



Obr. 26 Pohled do útroby přístroje z dolní strany

Nosný rám přístroje je natřený obyčejnou šedou základní syntetickou barvou. Krycí plechy jsou nastříkány lesklým polyuretanovým lakem U2072 v odstínu RAL5021 (vodní modř). Krycí rámeček panelu je nastříkán bílým akrylátovým autolakem.

4. Popis programu

Programové vybavení elektronické zátěže se skládá z programu pro řídicí mikropočítač a z programu pro PC umožňujícího ovládání zátěže, záznam a zpracování naměřených hodnot. Program pro MCU byl vytvořen ve vývojovém prostředí Atmel AVR Studio a napsán v jazyce C. Ovládací program pro PC byl vytvořen v prostředí Borland Delphi, které vychází z Pascalu.

Program pro MCU musí být vytvořen tak, aby MCU stále věděl „co má dělat“. Proto je hlavní část programu tvořena neustále se opakující smyčkou, aby nikdy nedošlo k zastavení chodu programu. Naproti tomu program pro PC čeká na nějakou událost (stisk tlačítka, doběhnutí časovače) a podle toho vždy vykoná příslušný podprogram. V mezičase, kdy není žádný požadavek, program prostě „nedělá nic“.

4.1 Program řídicího mikropočítače

Celý výpis programu pro MCU je uveden v příloze včetně komentářů. Po zapnutí napájení se začíná vykonávat hlavní část programu označená „main“. Zde se nejdříve nastavují porty (vstupy/výstupy) a periferie MCU, případně se zadávají výchozí hodnoty pro některé proměnné. Informace pro nastavení registrů jednotlivých periférií lze nalézt v katalogovém listu MCU [6]. Následuje nekonečná smyčka „while(1)“, ze které už program až do vypnutí (resetu MCU) nevyskočí.

Sled činností programu MCU je následující:

- 1) Načtení stavu tlačítek a přepínačů na panelu a uložení do příslušných proměnných (podprogram *Nacteni_tlacitek*). Názvy proměnných odpovídají označení jednotlivých prvků (např. SA1, SB2 apod.)
- 2) Změření napětí na analogových vstupech MCU, postupně se provádí A/D převod signálů na jednotlivých vstupech ADC0..ADC7 a ukládání do příslušných proměnných (provádí podprogram *AD_prevod*). V každém kroku se zvolí, z kterého vstupu se bude převádět, a následně se pustí A/D převod. Po dobu převodu program čeká na dokončení, nedělá nic jiného.
- 3) Vyhodnocení naměřeného napětí a proudu (z hodnot zjištěných v bodu 2). Probíhá úprava dat pro displeje naměřených hodnot, detekce přetečení rozsahu, vyhlášení alarmu při překročení napětí „ALM_UMAX“ nebo proudu „ALM_IMAX“ (provádí podprogram *Mereni_UI*).
- 4) Pokud je zapnutá podpěťová ochrana, provádí se porovnání nastavené hodnoty min. napětí se skutečným napětím na zátěži. Pokud napětí na zátěži klesne pod nastavenou úroveň, vyhláší se alarm „ALM_UMIN“ (provádí podprogram *Podpetova_ochrana*).
- 5) Vypočtení přibližné hodnoty okamžitého ztrátového výkonu, pokud výkon překročí povolenou pracovní oblast, je vyhlášen alarm „ALM_PMAX“ (provádí podprogram *Hlidani_PMAX*).
- 6) Ovládání chodu ventilátorů na základě teploty chladičů (tj. hodnot zjištěných v bodě 2), případně při překročení určitého ztrátového výkonu. Ventilátory se zapínají při teplotě chladiče cca 45 °C a vypínají při cca 35 °C. Kromě toho, pokud ztrátový výkon překročí cca 200 W, jsou s určitým zpožděním (cca 10 s) ventilátory spuštěny bez ohledu na teplotu chladičů. Pokud ztrátový výkon poklesne a teplota chladičů je nižší než cca 35 °C, jsou opět s určitým zpožděním ventilátory vypnuty. Pokud teplota vzroste nad cca 55 °C, je vyhlášen alarm „ALM_TMAX“ (provádí podprogram *Chlazení*).

- 7) Vyhodnocení alarmů. Pokud byl v předchozích bodech vyhlášen nějaký alarm a zátěž je zapnutá, dochází k jejímu vypnutí se současným výpisem čísla alarmu na displeji min. napětí. (provádí podprogram *Alarmy*)
- 8) Pokud je zapnut pulsní režim, vyhodnocuje se nastavená hodnota kmitočtu z potenciometru (získaná v bodě 2) a dochází k periodickému odpojování zátěže. (provádí podprogram *Pulsace*)
- 9) Pokud bylo stisknuto tlačítko SB2 (STOP/RESET), ruší se chybová hlášení (pokud jejich příčina stále netrvá). Dále se nahazuje relé KA3, které mohlo být vypnuto v důsledku aktivního alarmu.
- 10) Pokud bylo stisknuto tlačítko SB1 (START), zátěž není přepnutá do „PC“ režimu a zároveň není přítomen žádný alarm bránící zapnutí, povoluje se provoz.
- 11) Vyhodnocení zvoleného režimu. Změna režimu je možná pouze ve stavu STOP. Podle navoleného režimu se volá příslušný podprogram *U_rezim*, *I_rezim*, *R_rezim* zajišťující poslání dat do D/A převodníku a přípravu dat pro displej žádané hodnoty LED3. Tyto podprogramy se volají i v případě, že je zátěž v režimu „PC“ a z počítače přišel povel k přepnutí do daného režimu.
- 12) Nyní se provádí podprogram daného režimu (U, I, R). Ve všech případech je vstupním parametrem podprogramu žádaná hodnota U/I/R získaná buď z potenciometru na panelu (pokud je přepínač režimů v poloze „U“, „I“ nebo „R“), nebo z dat přijatých po sériové lince z PC (je-li zátěž přepnutá v režimu „PC“).
- 13) Nakonec se provádí aktualizace stavu LED displejů a diod na panelu. (provádí podprogram *Zapis_na_panel*)

Pokud je zjištěno přijetí dat přes USART, je běh programu v kterémkoliv okamžiku přerušen a vykoná se příslušný přerušovací podprogram (označen *ISR(USART_RXC_vect)*). Podle přijatých dat zátěž odpoví odesláním datového nebo kontrolního slova. Blíže je způsob komunikace mezi PC a zátěží popsán v kap. 4.3.

Další použité podprogramy:

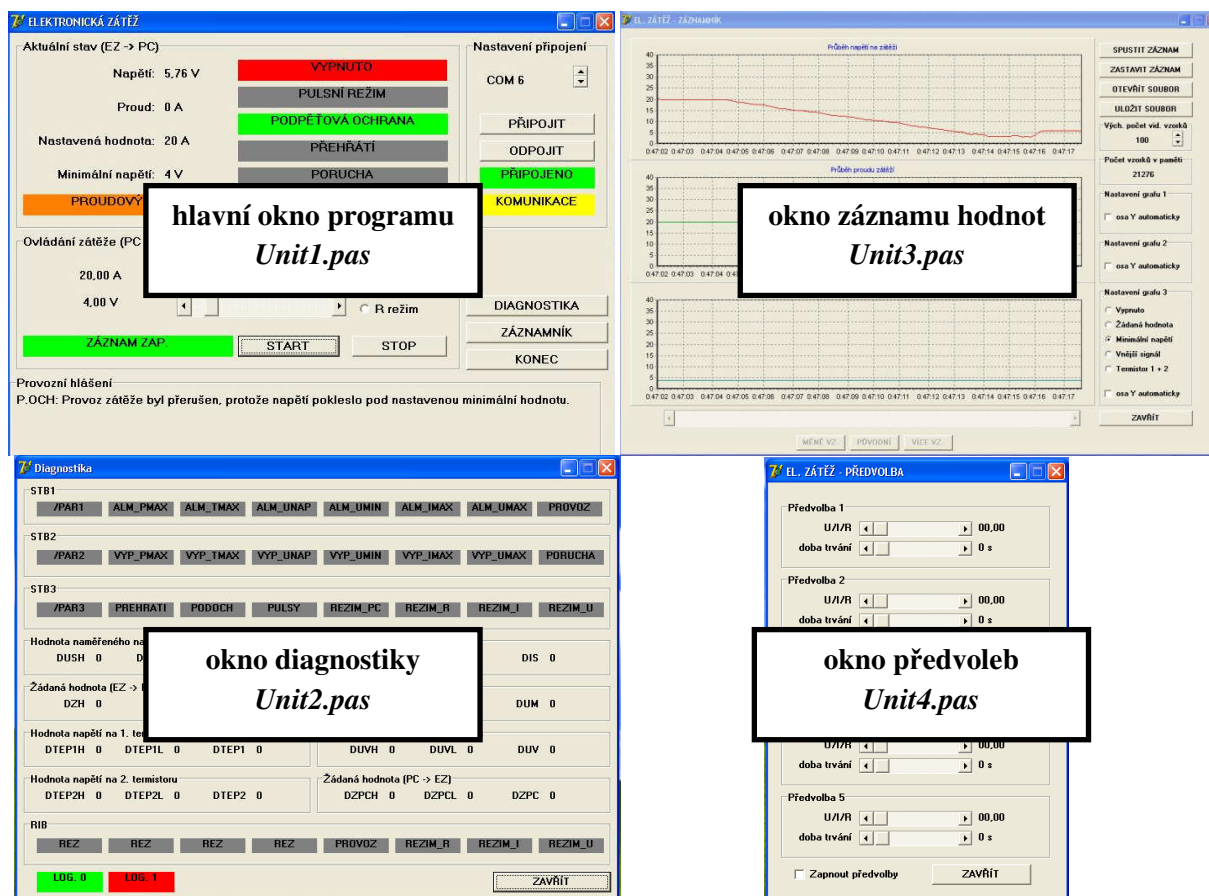
- *BIN_BCD* – zajišťuje převod binárního čísla na BCD kód pro jednotlivé číslice desítkového čísla v rozsahu 0 až 9999
- *BCD_7seg* – zajišťuje převod z BCD kódu na jednotlivé segmenty 7segmentového displeje. Umožňuje zobrazit číslice v rozmezí 0 až 9, písmena A, C, E, F, H, P, případně nezobrazit nic (displej vypnutý). Ovládá také desetinnou tečku u daného znaku. Použito pro displeje LED1 a LED3.
- *BCD_7seg_inv* – stejně jako předchozí, výstupní bity jsou v opačném pořadí. Použito pro displeje LED2 a LED4.

Velikost celého programu je cca 10 kB, takže programová paměť MCU je využita cca z 60%. Datová paměť MCU obsahující proměnné používané programem je využita cca z 20%.

Programování lze provádět přímo v zapojení pomocí SPI rozhraní vyvedeného na programovací konektor. MCU má od výroby zapnuté rozhraní JTAG využívající část portu C (konkrétně PC2 až PC5), které blokuje použití portu jako klasické vstupy/výstupy. Proto je třeba JTAG vypnout.

4.2 Ovládací program pro PC

Výpis programu včetně komentářů je uveden v příloze. Program se skládá ze 4 oken (viz obr. 27). Každému oknu přísluší textový soubor s programem (přípona *.pas). Program je tvořen dílčími podprogramy, které jsou spouštěny jako reakce na nějakou událost.



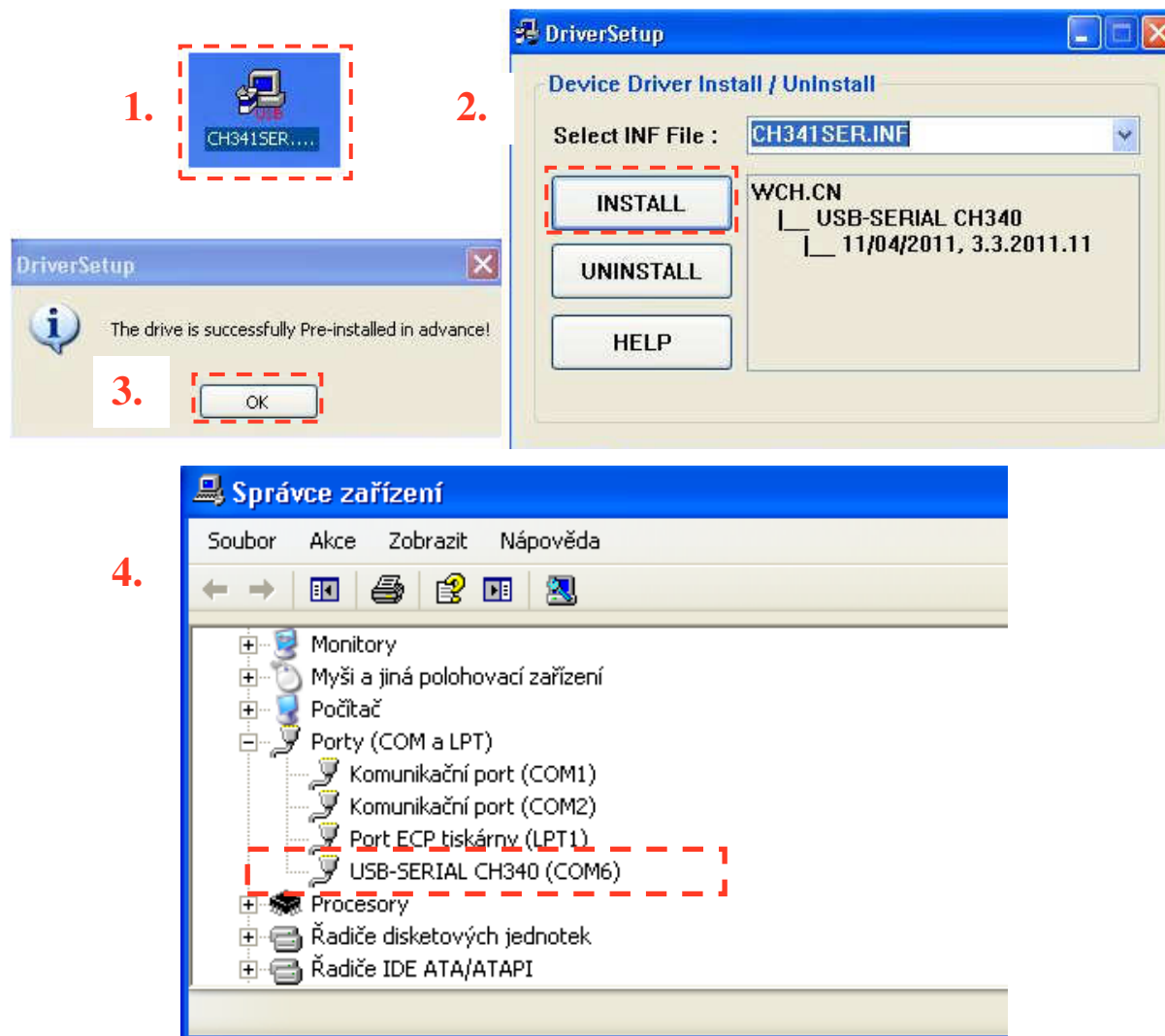
Obr. 27 Přehled oken ovládacího programu

Vlastní tvorba programu v prostředí Delphi je poměrně snadná, na pracovní plochu okna se vkládají komponenty (tlačítka, posuvníky, textová pole apod.) z nástrojové lišty. Postup při tvorbě programů je popsán v [16].

Hlavní část programu (zajišťující výměnu dat mezi PC a zátěží) je v souboru *Unit1.pas*. Zde jsou v úvodní deklaraci části programu vytvořena propojení na programy ostatních oken (*Unit2*, *3*, *4*). V programu *Unit1* lze tedy pracovat s proměnnými a komponentami ostatních oken, ale naopak to není možné. Komunikace přes sériový port je umožněna použitím knihovny *Port.dll*, připojené k programu. Ke knihovně náleží ještě soubory *Portinc.dcu* a *Portinc.pas*, kde lze najít seznam funkcí, které tato knihovna nabízí. Tyto soubory jsou součástí adresáře programu. Po vytvoření programu a následné kompilaci se automaticky vytvoří spustitelný *.exe soubor uložený rovněž v kořenovém adresáři programu. Funkčnost programu byla vyzkoušena v operačních systémech Windows 7, XP a 98. Kompatibilita se systémem Windows 8 nebyla ověřována, protože tento systém je dle mého názoru pro praktickou práci zcela nepoužitelný.

4.3 Popis komunikace PC ↔ zátěž

Parametry komunikace mezi zátěží a PC jsou pevně nastaveny (přenosová rychlost 9600 Bd, 8 datových bitů, 1 stop bit, bez parity). Jediné, co je potřeba zvolit, je číslo sériového portu PC, jež má být použito pro komunikaci. Pro rozhraní RS232 je číslo portu obvykle COM1 nebo COM2, při použití USB lze číslo portu zjistit ve správci zařízení (obr. 28). Samozřejmě musí být nainstalovány příslušné ovladače zařízení (na přiloženém CD, případně ke stažení na stránkách čínského výrobce USB převodníku <http://wch-ic.com/>).



Obr. 28 Instalace ovladače USB převodníku

Při komunikaci vždy nejdříve PC vyšle datový bajt, podle obsahu bajtu EZ odpoví buď zasláním požadovaných dat, případně zasláním kontrolního bajtu potvrdí svou připravenost na příjem dalších dat z PC. Cyklická výměna dat PC↔EZ probíhá cca 2x za vteřinu.

Výměna dat během komunikačního cyklu		
Směr	Bajt	Popis
PC→EZ	„1“	PC pošle znak „1“, EZ odpoví zasláním trojice stavových bajtů STB1, 2, 3. Jednotlivé bajty jsou vysílány s minimální prodlevou, PC UART ukládá přijatá data do zásobníkové paměti typu FIFO, takže se nemusí čekat na vyprázdnění přijímacího registru.
EZ→PC	STB1 (1)	
	STB2 (2)	
	STB3 (3)	
PC→EZ	„2“	PC pošle znak „2“, EZ odpoví zasláním dvojice bajtů skutečného napětí. DUSL je dolní bajt, DUSH je horní bajt.
EZ→PC	DUSL (4)	
	DUSH (5)	
PC→EZ	„3“	PC pošle znak „3“, EZ odpoví zasláním dvojice bajtů skutečného proudu. DISL je dolní bajt, DISH je horní bajt.
EZ→PC	DISL (6)	
	DISH (7)	
PC→EZ	„4“	PC pošle znak „4“, EZ odpoví zasláním dvojice bajtů nastavené žádané hodnoty U/I/R. DZL je dolní bajt, DZH je horní bajt.
EZ→PC	DZL (8)	
	DZH (9)	
PC→EZ	„5“	PC pošle znak „5“, EZ odpoví zasláním dvojice bajtů nastavené hodnoty minimálního napětí. DUML je dolní bajt, DUMH je horní bajt.
EZ→PC	DUML (10)	
	DUMH (11)	
PC→EZ	„6“	PC pošle znak „6“, EZ odpoví zasláním dvojice bajtů napětí na vnějším vstupu. DVL je dolní bajt, DVH je horní bajt.
EZ→PC	DVL (12)	
	DVH (13)	
PC→EZ	„7“	PC pošle znak „7“, EZ odpoví zasláním dvojice bajtů napětí na 1. termistoru. DTEP1L je dolní bajt, DTEP1H je horní bajt.
EZ→PC	DTEP1L (14)	
	DTEP1H (15)	
PC→EZ	„8“	PC pošle znak „8“, EZ odpoví zasláním dvojice bajtů napětí na 2. termistoru. DTEP2L je dolní bajt, DTEP2H je horní bajt.
EZ→PC	DTEP2L (16)	
	DTEP2H (17)	
Pokud je zátěž přepnutá na ovládání z čelního panelu, komunikační cyklus tady končí. V opačném případě (režim PC) se pokračuje dále.		
PC→EZ	„14“	PC pošle znak „14“, EZ odpoví kontrolním bajtem 0x85 („133“). Pak PC vyšle řídicí bajt RIB a EZ odpoví 0x8A („138“).
EZ→PC	0x85 (18)	
PC→EZ	RIB	
EZ→PC	0x8A (19)	
PC→EZ	„12“	PC pošle znak „12“, EZ odpoví kontrolním bajtem 0x83 („131“). Pak PC vyšle dolní bajt žádané hodnoty U/I/R DZPCL a EZ odpoví 0x86 („134“). Následně PC vyšle horní bajt DZPCH a EZ odpoví 0x87 („135“).
EZ→PC	0x83 (20)	
PC→EZ	DZPCL	
EZ→PC	0x86 (21)	
PC→EZ	DZPCH	
EZ→PC	0x87 (22)	
PC→EZ	„13“	PC pošle znak „13“, EZ odpoví kontrolním bajtem 0x84 („132“). Pak PC vyšle dolní bajt žádané hodnoty minimálního napětí DUMPCL a EZ odpoví 0x88 („136“). Následně PC vyšle horní bajt DUMPCH a EZ odpoví 0x89 („137“).
EZ→PC	0x84 (23)	
PC→EZ	DUMPCL	
EZ→PC	0x88 (24)	
PC→EZ	DUMPCH	
EZ→PC	0x89 (25)	
Konec komunikačního cyklu		

Struktura a význam jednotlivých datových bajtů

1. stavový bajt STB1

STB1	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
	0	ALM_PMAX	ALM_TMAX	ALM_UNAP	ALM_UMIN	ALM_IMAX	ALM_UMAX	PROVOZ

- ALM_PMAX – právě dochází k překračování max. ztrátového výkonu
- ALM_TMAX – nadměrná teplota chladiče výkonové části
- ALM_UNAP – porucha napájecího zdroje (chybí některé napětí)
- ALM_UMIN – napětí na zátěži je nižší než nastavená min. hodnota
- ALM_IMAX – nadměrný proud zátěží
- ALM_UMAX – nadměrné napětí na zátěži
- PROVOZ – zátěž je zapnutá

2. stavový bajt STB2

STB1	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
	0	VYP_PMAX	VYP_TMAX	VYP_UNAP	VYP_UMIN	VYP_IMAX	VYP_UMAX	PORUCHA

- VYP_PMAX – došlo k vypnutí v důsledku překročení max. ztrátového výkonu
- VYP_TMAX – došlo k vypnutí v důsledku přehřátí výkonové části
- VYP_UNAP – došlo k vypnutí v důsledku poruchy napájecího zdroje
- VYP_UMIN – došlo k vypnutí v důsledku reakce podpěťové ochrany
- VYP_IMAX – došlo k vypnutí v důsledku překročení max. proudu
- VYP_UMAX – došlo k vypnutí v důsledku překročení max. napětí
- PORUCHA – svítí výstražná LED „PORUCHA“

3. stavový bajt STB3

STB1	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
	0	PREHRATI	PODOCH	PULSY	REZIM_PC	REZIM_R	REZIM_I	REZIM_U

- PREHRATI – svítí výstražná LED „PŘEHŘÁTÍ“
- PODOCH – podpěťová ochrana je zapnutá
- PULSY – pulsní režim je zapnut
- REZIM_PC – na EZ je navolen PC režim
- REZIM_R – na EZ je navolen R režim
- REZIM_I – na EZ je navolen I režim
- REZIM_U – na EZ je navolen U režim

Řídicí bajt RIB

RIB	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
	REZ	REZ	REZ	REZ	PROVOZ	REZIM_R	REZIM_I	REZIM_U

- REZ – nevyužité bity
- PROVOZ – zapínání/vypínání zátěže z PC
- REZIM_R –nastavení EZ do režimu R (z PC)
- REZIM_I –nastavení EZ do režimu I (z PC)
- REZIM_U –nastavení EZ do režimu U (z PC)

12bitové proměnné

DUSL	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
DISL								
DZL								
DUML	0	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0 (LSB)
DZPCL								
DUMPCL								
DUSH	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
DISH								
DZH								
DUMH	0	0	0	D11 (MSB)	D10	D9	D8	D7
DZPCH								
DUMPCH								

10bitové proměnné

DUVL	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
DTEP1L								
DTEP2L	0	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0 (LSB)
DUVH	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
DTEP1H								
DTEP2H	0	0	0	0	0	D9 (MSB)	D8	D7

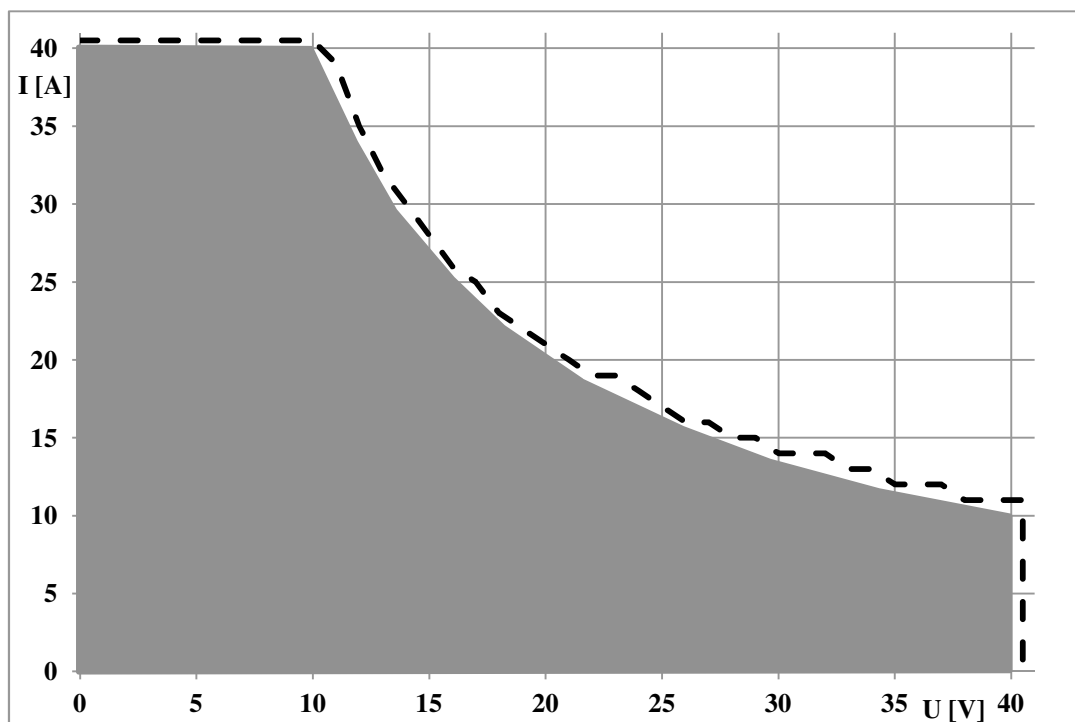
Datové bajty (STB1, DUSL, DISH apod.) vysílané EZ → PC mají hodnotu v rozsahu 0 – 127, protože nejvyšší bit je vždy v log. 0. Kontrolní bajty vysílané EZ při ovládání z PC leží v rozsahu 128 – 255. V ovládacím programu je hlídána doba odezvy komunikace, při překročení limitu (cca 500 ms) je komunikace zastavena a program vyhlásí chybu. Pokud je EZ v režimu místního řízení z ovládacího panelu, chyba komunikace (např. odpojení kabelu) nijak neovlivní chod zátěže. Pokud je zátěž v režimu řízení z PC, hlídá se doba odezvy i na straně zátěže, takže při přerušení komunikace zátěž automaticky přejde do stavu STOP a vypíše na displeji chybu „CH06“. Tím je zamezeno tomu, aby zátěž po výpadku komunikace s PC, tedy ztrátě řídicích signálů, setrvala v zapnutém stavu.

5. Návod k obsluze elektronické zátěže

Technické údaje:

- napájecí napětí: 230 V/50 Hz
- příkon: max. 60 VA
- max. provozní napětí: 40 V
- max. provozní proud: 40 A
- max. ztrátový výkon: 400 W
- provozní režimy: konstantní proud (0-40 A), napětí (0-40 V), odpor (1-50 Ω)
- další funkce: pulsní režim, vypnutí při dosažení nastaveného napětí, komunikace s PC
- rozměry (Š x V x H): 500 x 200 x 480
- hmotnost: cca 23 kg

Elektronická zátěž je určena ke zkoušení různých napájecích zdrojů, akumulátorů apod. Dovolená pracovní oblast, v níž se může zátěž během provozu pohybovat, je na obr. 29. Čárkovaně je vyznačena hranice, při níž je provoz zátěže přerušen z důvodu ochrany před přetížením. K zátěži smí být připojeno pouze stejnosměrné napětí, přičemž je třeba **dodržovat správnou polaritu!!** Protože tranzistory použité ve výkonové části zátěže jsou vybaveny nulovými diodami, při přepólování by zátěž představovala v podstatě zkrat a proud by byl omezen pouze parametry připojeného zdroje.

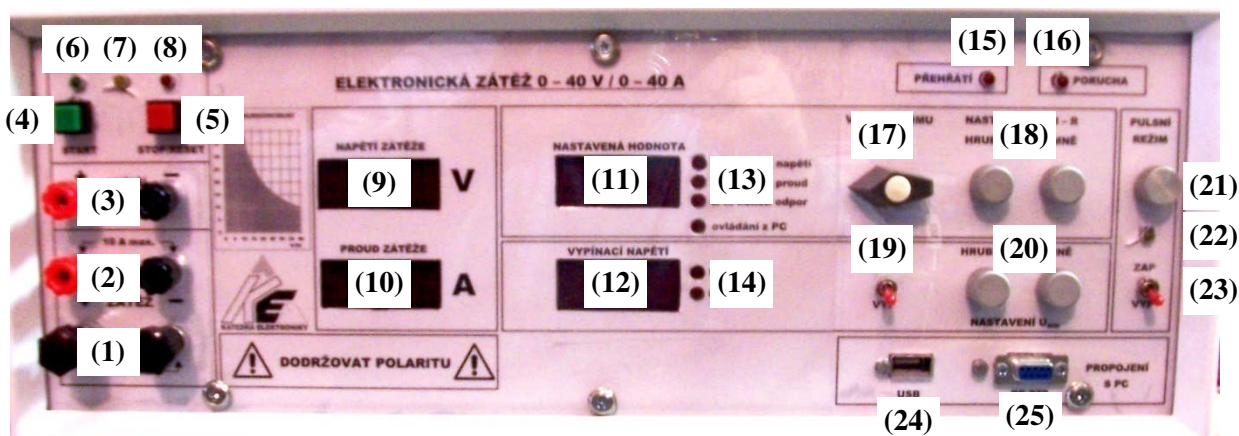


Obr. 29 Povolená pracovní oblast zátěže

Na obr. 30 je rozložení ovládacích prvků na panelu přístroje. Zatěžovaný zdroj se připojuje na svorky (1) nebo (2). Menší svorky (2) jsou použitelné v oblasti menších proudů (do cca 10 A). Na svorky (3) lze připojit kabely pro snímání napětí přímo na měřeném zdroji pro omezení vlivu úbytku napětí na připojovacích vodičích silového obvodu. Pokud jsou nezapojené, měřené napětí je odvozeno z napětí na silových svorkách zátěže. Skutečný proud a napětí je zobrazován na LED displejích (9) a (10), při překročení měřicího rozsahu je zobrazeno „FFFF“. Přepínač (17) slouží pro volbu režimu U/I/R s místním ovládáním, případně dálkové řízení z PC. Změna režimu je možná pouze ve vypnutém stavu. Právě navolený režim je indikován svítivými diodami (13). Při místním ovládání se žádaná hodnota U/I/R nastavuje dvojicí potenciometrů (18) umožňující hrubé a jemné nastavení. Nastavená žádaná veličina je zobrazena na LED displeji (11). Přepínačem (19) se zapíná podpěťová ochrana, úroveň vypínacího napětí se nastavuje dvojicí potenciometrů (20), nastavené napětí je zobrazeno na LED displeji (12). Aktuální stav je signalizován svítivými diodami (14). Pulsní režim se zapíná přepínačem (23), kmitočet pulsů se nastavuje potenciometrem (21) činnost je signalizována svítivou diodou (22). Zátěž se zapíná zeleným tlačítkem START (4), provoz je signalizován zelenou LED (6). Červené tlačítko STOP/RESET (5) slouží k vypnutí zátěže. Vypnutý stav je signalizován červenou LED (8). Žlutá LED (7) svítí, pokud je zátěž zapnutá a zároveň činnost není blokována pulsním režimem. Červená LED (15) signalizuje přehřátí výkonové části zátěže, LED (16) informuje o závadě elektroniky zátěže (viz dále). K propojení zátěže a PC lze použít rozhraní RS232 (25), případně USB (24). Pokud dojde k vypnutí zátěže v důsledku přetížení nebo jiné chyby, je na displeji (12) zobrazeno číslo chyby umožňující zjištění příčiny vypnutí. Před opětovným zapnutím je nutné smazat chybové hlášení červeným tlačítkem STOP/RESET (5).

Přehled zobrazovaných chybových hlášení:

- **CH01** – došlo k vypnutí v důsledku přehřátí
- **CH02** – došlo k vypnutí v důsledku poruchy zátěže (výpadek napájení)
- **CH03** – došlo k vypnutí v důsledku překročení max. proudu (40 A)
- **CH04** – došlo k vypnutí v důsledku překročení max. napětí (40 V)
- **CH05** – došlo k vypnutí v důsledku překročení max. ztrátového výkonu (400 W)
- **CH06** – došlo k vypnutí v důsledku přerušení komunikace s PC
- **P.OCH** - došlo k vypnutí v důsledku zákroku podpěťové ochrany



Obr. 30 Rozmístění prvků na čelním panelu

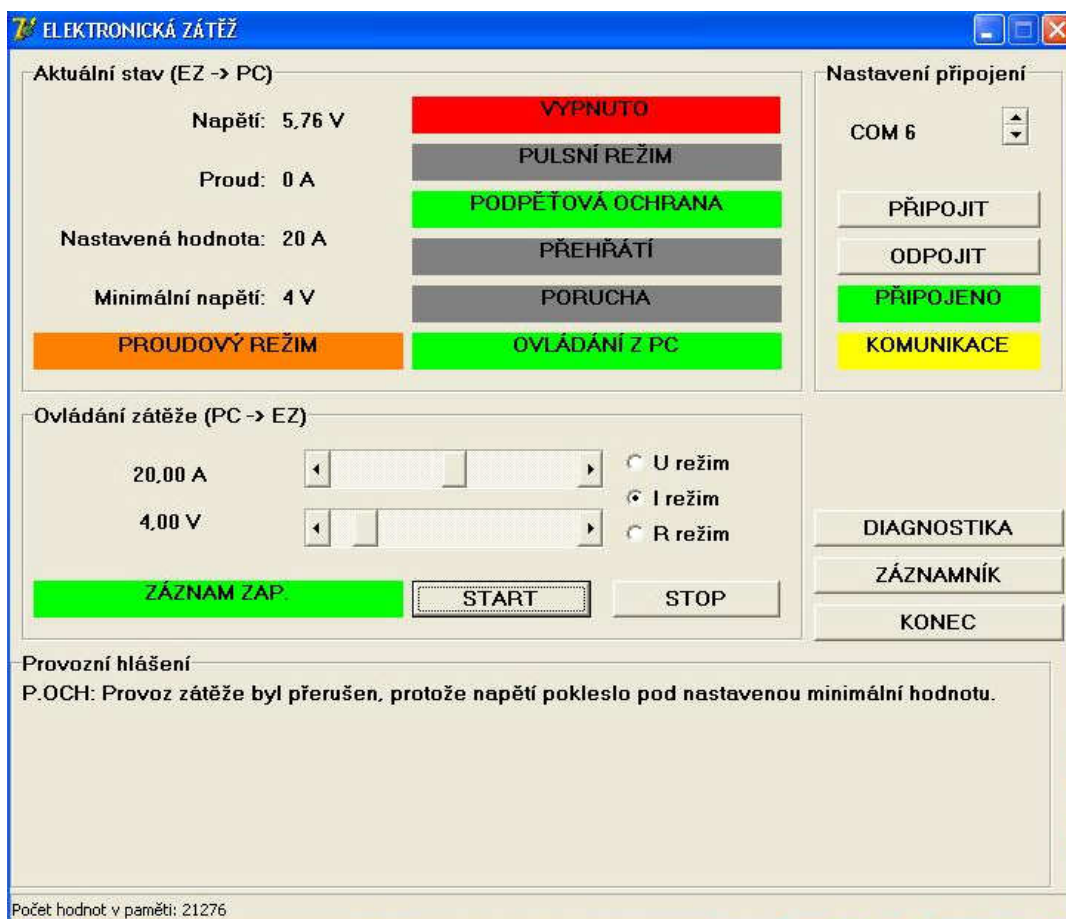
Pokud LED „PORUCHA“ svítí současně s chybovým hlášením CH02, došlo k výpadku některého napájecího napětí kromě +5V větve pro logické obvody.

Pokud LED „PORUCHA“ svítí současně s LED „PŘEHŘÁTÍ“ a displeje jsou zhasnuté, došlo k chybě MCU při vykonávání programu (přetečení časovače Watchdog).

Pokud LED „PORUCHA“ svítí, LED „PŘEHŘÁTÍ“ nesvítí a displeje jsou zhasnuté, došlo k poklesu napájecího napětí +5 V pro logické obvody pod hodnotu cca 4 V (to vyhodnocuje tzv. Brown-out ochrana v MCU).

Na levém boku přístroje je hlavní vypínač, síťová pojistka (F400 mA) a konektor pro připojení síťové šňůry. Na pravém boku je 15pinový konektor pro připojení vnějšího měřeného napětí. Zapojení konektoru je zakresleno v přiložené dokumentaci.

Ovládání přístroje z čelního panelu je poměrně snadné, takže další popis bude věnován ovládání zátěže s použitím PC programu. Po spuštění programu se otevře hlavní okno (viz obr. 31). V panelu „Nastavení připojení“ zvolíme číslo portu a klikneme na tlačítko „Připojit“, pokud je vše v pořádku, dojde k navázání komunikace mezi PC a zátěží. Způsob nastavení komunikačního portu je v kap. 4.3. V panelu „Aktuální stav“ jsou zobrazovány základní údaje o stavu zátěže, z hlavního okna lze také otevřít další okna programu (Diagnostika, Záznamník a Předvolba).



Obr. 31 Hlavní okno ovládacího programu

Panel „Ovládání zátěže“ slouží pro nastavení žádané hodnoty U/I/R, min. napětí a volbu režimu při řízení zátěže z PC. V panelu „Provozní hlášení“ jsou zobrazována chybová hlášení zátěže včetně vysvětlujícího textu.

Okno diagnostiky (obr. 32) slouží k prohlížení veškerých datových bajtů vyměňovaných v rámci komunikace PC ↔ EZ. Stavové a řídicí bajty jsou rozepsány na jednotlivé bity s barevně vyznačenou log. úrovní. Posílané číselné hodnoty jsou vypsány po jednotlivých bajtech (horní, dolní) a kromě toho se zobrazuje i výsledné číslo získané poskládáním těchto bajtů.

Diagnostika

STB1

/PAR1 ALM_PMAX ALM_TMAX ALM_UNAP ALM_UMIN ALM_IMAX ALM_UMAX PROVOZ

STB2

/PAR2 VYP_PMAX VYP_TMAX VYP_UNAP VYP_UMIN VYP_IMAX VYP_UMAX PORUCHA

STB3

/PAR3 PREHRATI PODOCH PULSY REZIM_PC REZIM_R REZIM_I REZIM_U

Hodnota naměřeného napětí

DUSH	0	DUSL	0	DUS	0
------	---	------	---	-----	---

Hodnota naměřeného proudu

DISH	0	DISL	0	DIS	0
------	---	------	---	-----	---

Žádaná hodnota (EZ -> PC)

DZH	0	DZL	0	DZ	0
-----	---	-----	---	----	---

Hodnota minimálního napětí

DUMH	4	DUML	8	DUM	520
------	---	------	---	-----	-----

Hodnota napětí na 1. termistoru

DTEPIH	2	DTEPIL	101	DTEPI	357
--------	---	--------	-----	-------	-----

Hodnota napětí na vnějším vstupu

DUVH	0	DUVL	1	DUV	1
------	---	------	---	-----	---

Hodnota napětí na 2. termistoru

DTEP2H	2	DTEP2L	105	DTEP2	361
--------	---	--------	-----	-------	-----

Žádaná hodnota (PC -> EZ)

DZPCH	0	DZPCL	0	DZPC	0
-------	---	-------	---	------	---

RIB

REZ REZ REZ REZ PROVOZ REZIM_R REZIM_I REZIM_U

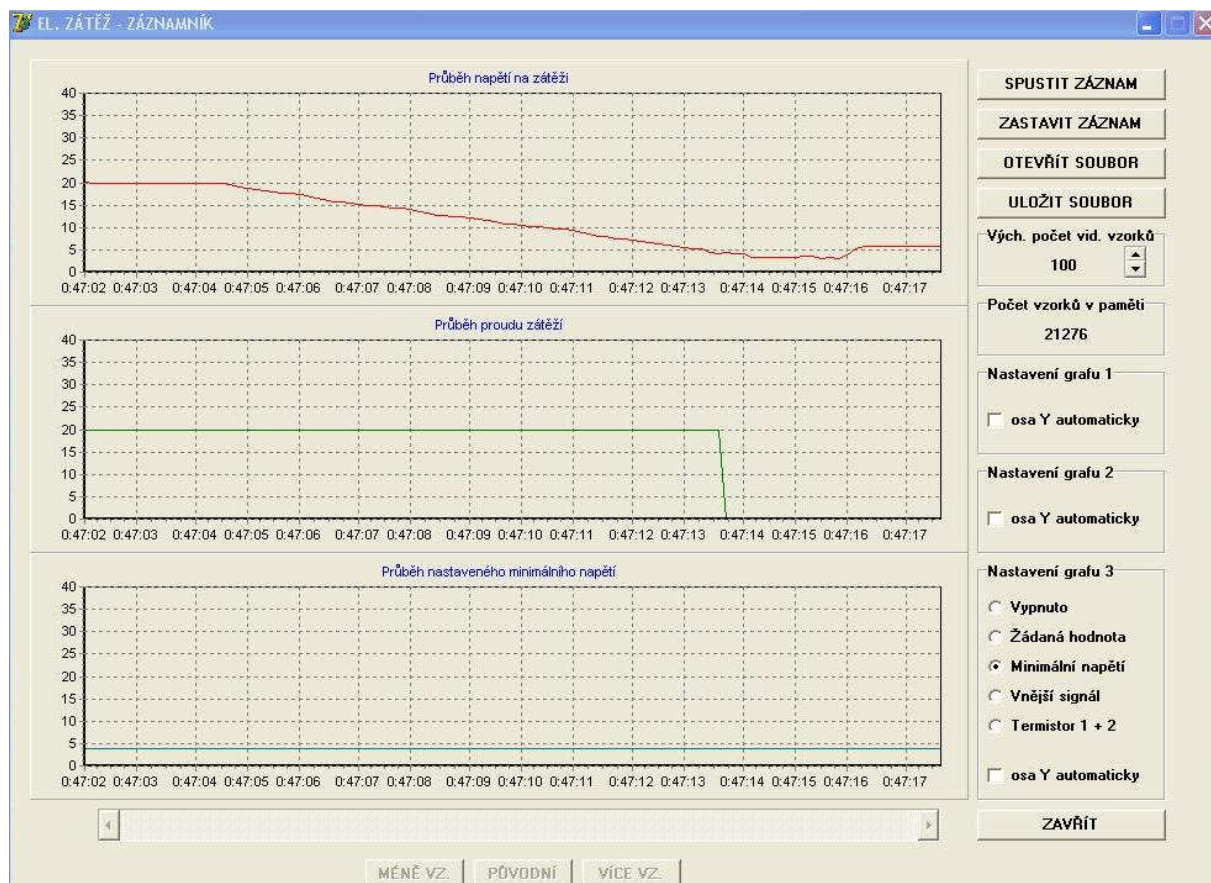
LOG. 0 LOG. 1

ZAVŘÍT

Obr. 32 Okno diagnostiky PC programu

Na obr. 33 je pohled na okno umožňující záznam hodnot do grafu, uložení do souboru a prohlížení dříve uložených souborů. Vytvořené soubory lze jednoduše otevřít pouze v tomto programu, protože jsou uloženy ve specifickém formátu – obsahují proměnné různých datových typů:

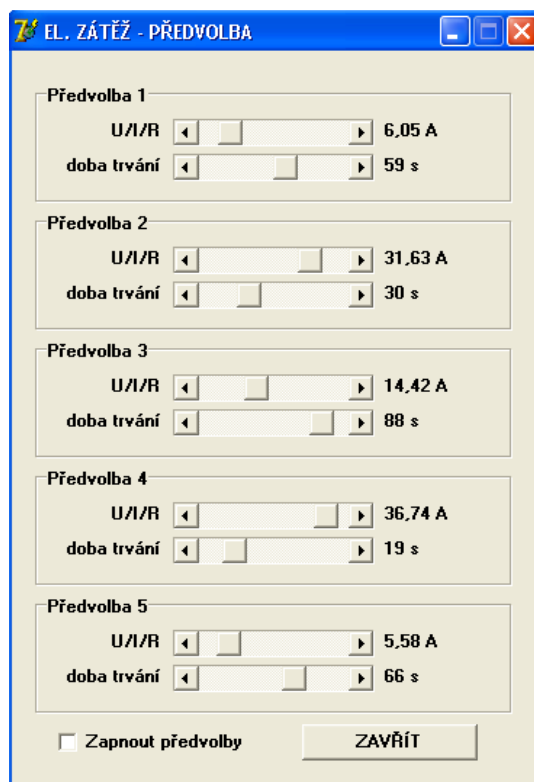
```
type TData = record //Deklarace datového typu záznam
    DataUMER : Integer; //měřené napětí
    DataIMER : Integer; //měřený proud
    DataUEXT : Integer; //vnější napětí
    DataUMIN : Integer; //min. napětí
    DataZAD : Integer; //žádaná hodnota U/I/R
    DataUTEPI1 : Integer; //napětí na 1. termistoru
    DataUTEPI2 : Integer; //napětí na 2. termistoru
    DataCAS : TDateTime; //aktuální čas
end;
```

Obr. 33 Okno záznamníku hodnot

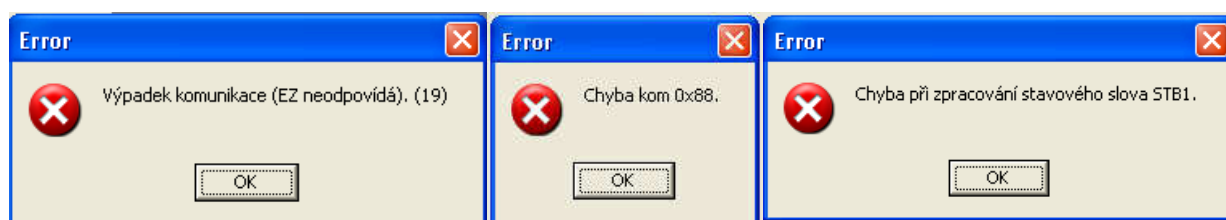
Tlačítka „SPUSTIT ZÁZNAM“ a „ZASTAVIT ZÁZNAM“ slouží k ovládání záznamu hodnot. Během záznamu jsou blokovány některé funkce, nelze např. měnit počet zobrazených vzorků ve viditelné části grafu (tedy měřítko časové osy). Horní 2 grafy zobrazují průběhy skutečného napětí a proudu, průběh zobrazený na dolním grafu je volitelný. Přepínání zobrazení lze provádět i dodatečně, protože během záznamu se ukládají všechny veličiny, tedy i ty, které zrovna nejsou zobrazeny. Dále je možné zapnout automatický rozsah pro svislé osy jednotlivých grafů. Během záznamu se hodnoty ukládají do paměti RAM PC, přičemž aktuální počet vzorků je zobrazen na samostatném panelu. Význam tlačítek „ULOŽIT SOUBOR“ a „OTEVŘÍT SOUBOR“ je jasný, po stisku se zobrazí klasické dialogové okno systému Windows umožňující zvolit žádaný soubor. Na příponě souboru nezáleží.

Další částí programu je okno předvoleb (obr. 34), které umožňuje nastavit až 5 žádaných hodnot $U/I/R$ a dobu trvání jednotlivých hodnot v rozmezí 0 – 100 s. Při nastaveném nulovém čase je daná předvolba přeskočena. Předvolby se zapínají označením příslušného políčka v dolní části okna a zůstávají aktivní i po zavření okna. Zapnutí předvoleb je zobrazeno také v hlavním okně vedle tlačítek START/STOP. Nastavení předvoleb lze měnit i za provozu zátěže.



Obr. 34 Okno předvoleb

Při přerušení komunikace mezi PC a zátěží (vypnutí zátěže, odpojení kabelu) se zobrazí chybové hlášení (obr. 35a). Po potvrzení lze opět stisknutím tlačítka „PŘÍPOJIT“ v hlavním okně programu navázat komunikaci. Číslo v závorce na konci chybového hlášení (1 až 25) udává, ve které fázi přenosu došlo k přerušení. Tato čísla jsou vypsána v tabulce popisující postup komunikacev kap. 4.3.



a)

b)

c)

Obr. 35 Chybová hlášení při výpadku komunikace

Hlášení na obr. 35b informuje o rozporu mezi předpokládaným a skutečně přijatým kontrolním bajtem. Tyto kontrolní bajty se posílají při řízení zátěže z PC (viz opět kap. 4.3). Hlášení na obr. 35c ohlašuje chybu programu, ke které došlo při rozkladu stavového slova EZ na jednotlivé bity. Tato hlášení se prakticky neobjevují, protože svědčí o chybě v běhu programu MCU (resp. PC), nicméně pro úplnost je vhodné se o nich zmínit.

6. Ověření funkčnosti zátěže

6.1 Přesnost měření napětí a proudu

Při měření byl proud zátěží měřen externím ampérmetrem tvořeným bočníkem Metra 75 A/60 mV/0,1 % a digitálním voltmetrem HP3455A. Napětí na zátěži bylo měřeno digitálním multimetrem Metra M1T290.

Při posuzování přesnosti měření obecně platí [19]:

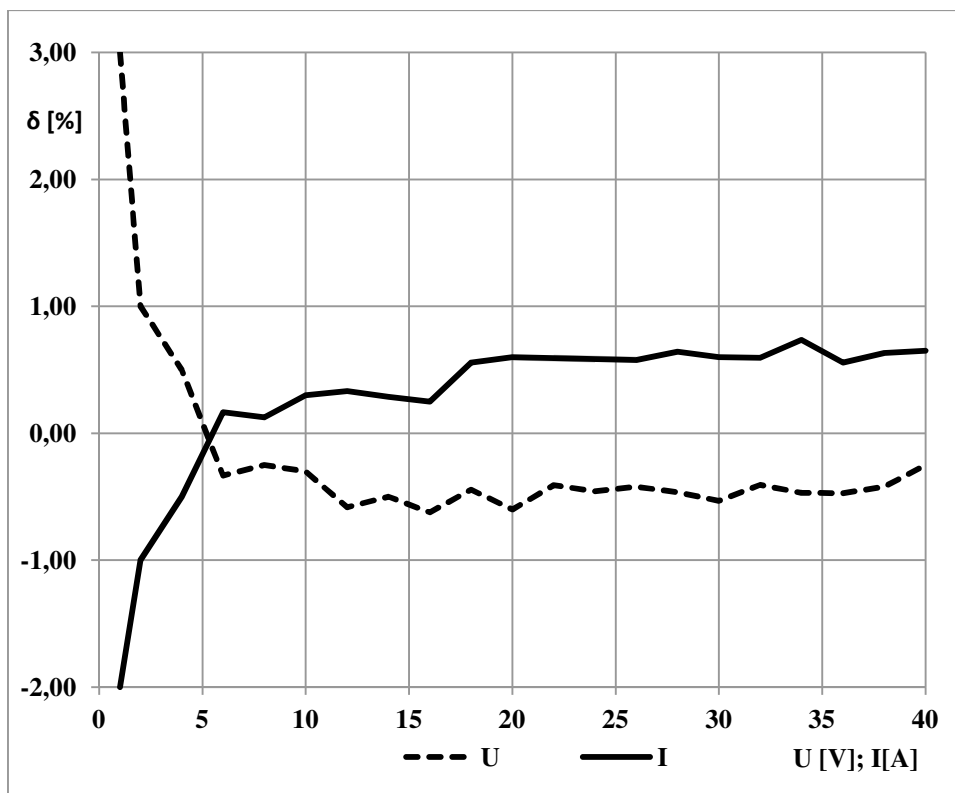
- absolutní chyba: $\Delta = X_M - X_S$, kde X_M je naměřená hodnota a X_S skutečná hodnota veličiny

- relativní chyba: $\delta = \frac{\Delta}{X_M} \cdot 100 [\%]$

U_M a I_M jsou veličiny měřené přímo zátěží, U_S a I_S jsou skutečné hodnoty veličin zjištěné vnějšími měřicími přístroji.

<u>Chyba měření napětí</u>			
U_M [V]	U_S [V]	Δ [V]	δ [%]
1	0,97	0,03	3,00
2	1,98	0,02	1,00
4	3,98	0,02	0,50
6	6,02	-0,02	-0,33
8	8,02	-0,02	-0,25
10	10,03	-0,03	-0,30
12	12,07	-0,07	-0,58
14	14,07	-0,07	-0,50
16	16,10	-0,10	-0,63
18	18,08	-0,08	-0,44
20	20,12	-0,12	-0,60
22	22,09	-0,09	-0,41
24	24,11	-0,11	-0,46
26	26,11	-0,11	-0,42
28	28,13	-0,13	-0,46
30	30,16	-0,16	-0,53
32	32,13	-0,13	-0,41
34	34,16	-0,16	-0,47
36	36,17	-0,17	-0,47
38	38,16	-0,16	-0,42
40	40,10	-0,10	-0,25

<u>Chyba měření proudu</u>			
I_M [A]	I_S [A]	Δ [A]	δ [%]
1	1,02	-0,02	-2,00
2	2,02	-0,02	-1,00
4	4,02	-0,02	-0,50
6	5,99	0,01	0,17
8	7,99	0,01	0,12
10	9,97	0,03	0,30
12	11,96	0,04	0,33
14	13,96	0,04	0,29
16	15,96	0,04	0,25
18	17,90	0,10	0,56
20	19,88	0,12	0,60
22	21,87	0,13	0,59
24	23,86	0,14	0,58
26	25,85	0,15	0,58
28	27,82	0,18	0,64
30	29,82	0,18	0,60
32	31,81	0,19	0,59
34	33,75	0,25	0,74
36	35,80	0,20	0,56
38	37,76	0,24	0,63
40	39,74	0,26	0,65



Obr. 36 Průběh chyby měření napětí a proudu

Z naměřených hodnot vyplývá, že v oblasti vyšších napětí a proudů (nad cca 3 V a 3 A) se chyba měření napětí a proudu pohybuje v tolerančním pásmu $\pm 1\%$ (viz obr. 36).

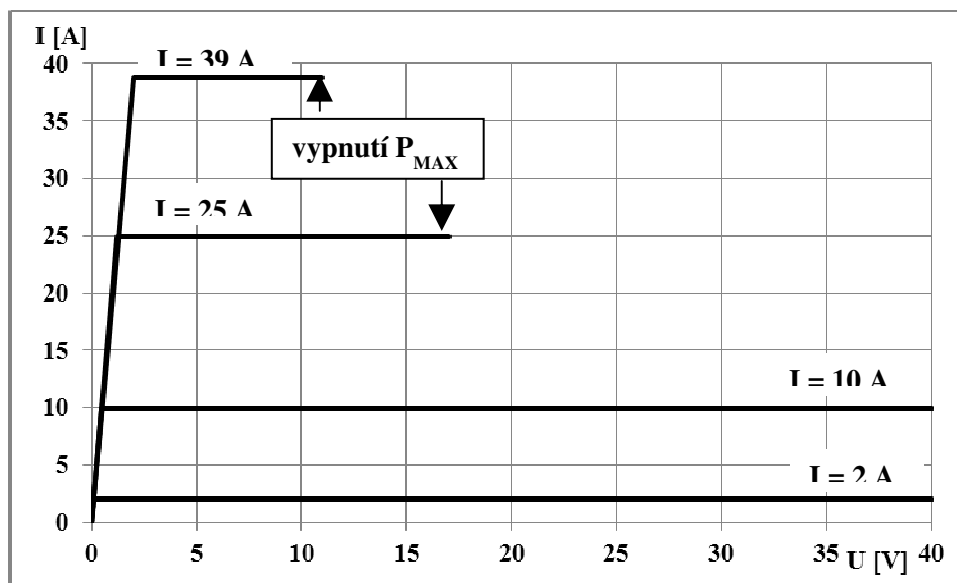
6.2 Provoz v proudovém režimu

V režimu konstantního proudu by zátěž měla odebírat nastavený proud v ideálním případě bez ohledu na napětí. Ve skutečnosti je minimální napětí dáno nejmenším úbytkem na plně otevřených tranzistorech, vyrovnávacích odporech, bočníku... (viz kap. 2.1).

Měření bylo provedeno pro 4 hodnoty proudu:

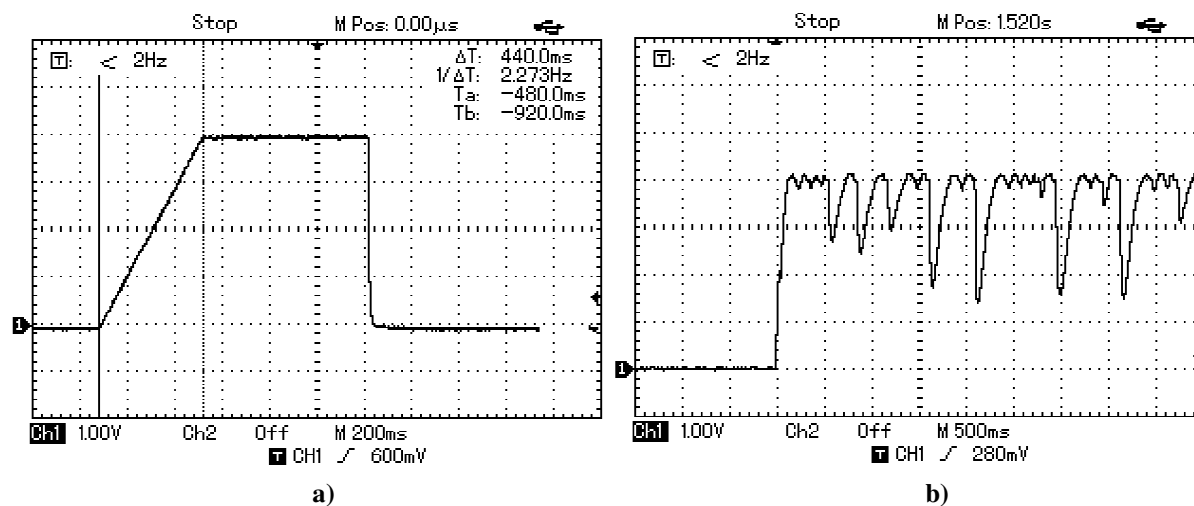
- a) $I = 2\text{ A} \rightarrow U_{\text{MIN}} = 0,1\text{ V}$ (tj. použitelný rozsah 0,1 až 40 V)
- b) $I = 10\text{ A} \rightarrow U_{\text{MIN}} = 0,5\text{ V}$ (tj. použitelný rozsah 0,5 až 40 V)
- c) $I = 25\text{ A} \rightarrow U_{\text{MIN}} = 1,2\text{ V}$ (tj. použitelný rozsah 1,2 až 17 V (omezeno ztrátovým výkonem))
- d) $I = 39\text{ A} \rightarrow U_{\text{MIN}} = 2\text{ V}$ (tj. použitelný rozsah 2 až 11 V (omezeno ztrátovým výkonem))

Ve všech případech byl proud v rozmezí použitelného rozsahu napětí stabilní a odpovídal nastavené hodnotě (s uvažováním nepřesností měření uvedených v kap. 6.1). Výsledky měření jsou zobrazeny na obr. 37.



Obr. 37 Naměřená VA charakteristika zátěže v režimu I

Pro zajímavost je obr. 38a uveden průběh proudu při startu zátěže a max. žádané hodnotě proudu 40 A. Nárůst proudu je plynulý, doba náběhu je cca 440 ms. Tato rampa je vytvořena programově, protože některé zdroje mohou mít se skokovým nárůstem proudu problém. Konkrétně při zkoušení byl použit zdroj Mesit 0-40 V/0-40 A, který je tvořen řízeným usměrňovačem (předregulátor) a tranzistorovým stabilizátorem [20]. Na obr. 38b je průběh proudu s příliš rychlým náběhem, zdroj není schopen naběhnout na ustálenou hodnotu proudu.

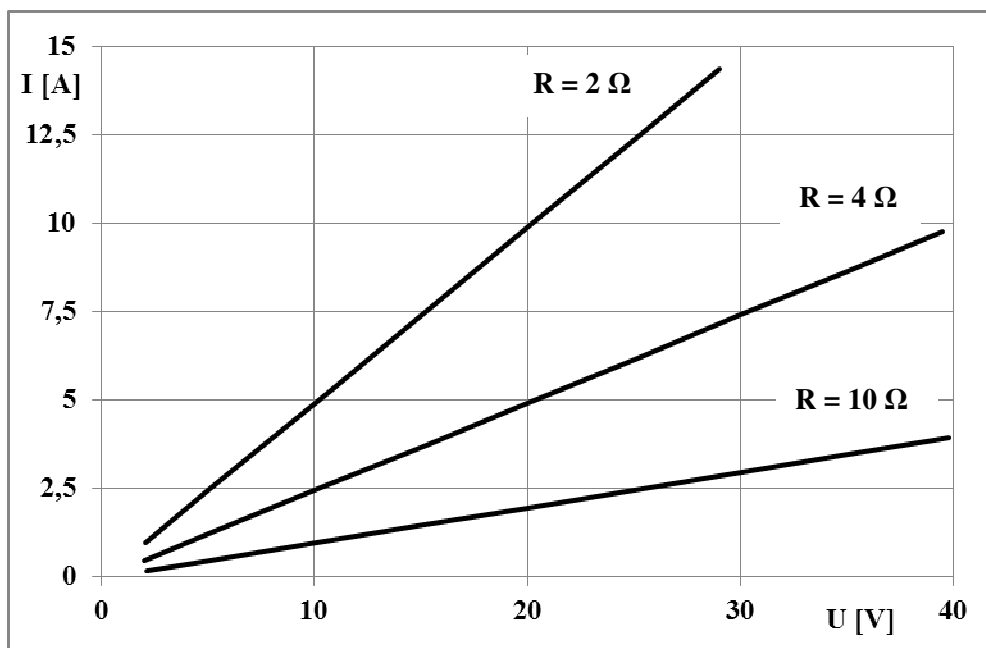


Obr. 38 Průběh náběhu proudu 0 → 40 A (měřítko 10 A/dílek)

6.3 Provoz v odporovém režimu

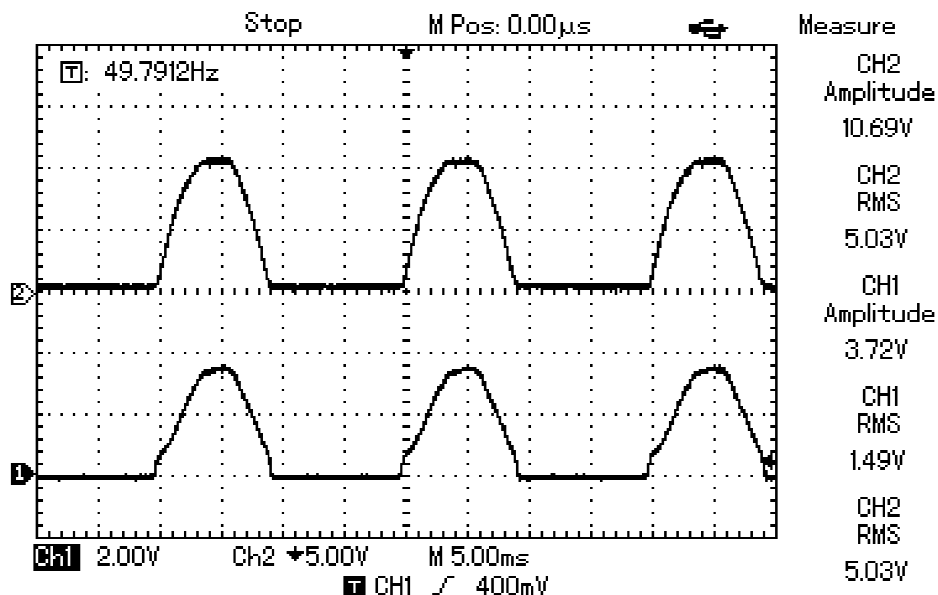
Z tabulky naměřených hodnot vyplývá, že odchylky mezi nastavenou a vypočítanou hodnotou odporu jsou poměrně velké. Dále je patrné, že s rostoucím napětím na zátěži se přesnost zvětšuje. Hodnoty označené hvězdičkou nelze použít z důvodu překročení max. ztrátového výkonu. Položky označené pomlčkou nebyly měřeny z důvodu stále rostoucí odchylky, takže další měření nemělo smysl. Nicméně v oblasti nižších odporů (tedy vyšších proudů) je přesnost dostatečná. Jak vyplývá z obr. 39, zátěž se skutečně chová jako odpor, protože tvar VA charakteristiky je prakticky přímkový.

Naměřené hodnoty napětí a proudů při odporovém režimu												
R_N [Ω]	U_Z ≈ 2 V			U_Z ≈ 10 V			U_Z ≈ 25 V			U_Z ≈ 39 V		
	U_Z [V]	I_Z [A]	ΔR_S [Ω]	U_Z [V]	I_Z [A]	ΔR_S [Ω]	U_Z [V]	I_Z [A]	ΔR_S [Ω]	U_Z [V]	I_Z [A]	ΔR_S [Ω]
1	2,13	2,020	0,05	10,29	10,17	0,01	*	*	*	*	*	*
2	2,17	1,020	0,13	10,57	5,18	0,04	25,08	12,39	0,02	*	*	*
3	2,2	0,680	0,24	10,66	3,48	0,06	25,27	8,30	0,04	*	*	*
4	2,21	0,496	0,46	10,71	2,60	0,12	25,38	6,24	0,07	39,03	9,64	0,05
5	2,22	0,397	0,59	10,74	2,09	0,14	25,44	5,01	0,08	39,13	7,73	0,06
6	2,22	0,324	0,85	10,75	1,74	0,18	25,48	4,18	0,10	39,20	6,46	0,07
7	2,1	0,255	1,24	10,77	1,49	0,23	25,51	3,59	0,11	39,26	5,54	0,09
8	-	-	-	10,78	1,29	0,36	25,53	3,13	0,16	39,29	4,84	0,12
9	-	-	-	10,79	1,15	0,38	25,55	2,78	0,19	39,32	4,30	0,14
10	-	-	-	10,79	1,03	0,48	25,56	2,51	0,18	39,34	3,87	0,17
11	-	-	-	10,80	0,92	0,69	25,57	2,26	0,31	39,36	3,50	0,25
12	-	-	-	10,14	0,79	0,84	25,58	2,07	0,36	39,38	3,21	0,27
13	-	-	-	10,15	0,73	0,85	25,59	1,92	0,33	39,39	2,97	0,26
14	-	-	-	10,15	0,68	1,04	25,60	1,78	0,38	39,40	2,76	0,28
15	-	-	-	-	-	-	25,60	1,65	0,52	39,41	2,56	0,39
16	-	-	-	-	-	-	25,61	1,54	0,63	39,42	2,40	0,43
17	-	-	-	-	-	-	25,61	1,45	0,66	39,43	2,26	0,45
18	-	-	-	-	-	-	25,62	1,37	0,70	39,44	2,13	0,52
19	-	-	-	-	-	-	25,62	1,30	0,71	39,44	2,02	0,52
20	-	-	-	-	-	-	25,62	1,23	0,83	39,45	1,92	0,55
21	-	-	-	-	-	-	25,63	1,17	0,91	39,45	1,82	0,68
22	-	-	-	-	-	-	25,63	1,11	1,09	39,46	1,73	0,81
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39,46	1,66	0,77
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39,47	1,59	0,82
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39,47	1,52	0,97



Obr. 39 Naměřené VA charakteristiky v odporovém režimu

Pro zajímavost byla vyzkoušena činnost zátěže při napájení zátěže 1cestně usměrněným napětím. Na zátěži byl nastaven odpor 3 Ω. Naměřené průběhy jsou na obr. 40. Horní průběh (CH2) je napětí na zátěži a dolní průběh (CH1) je proud, který byl snímán jako úbytek napětí na bočníku (drátový odpor 1,1 Ω). Z toho vyplývá, že měřítko proudového průběhu je cca 1,8 A/dílek (resp. 0,9 A/V). Amplituda napětí je 10,69 V, amplituda proudu je 3,35 A. Výsledný odpor je $10,69:3,35 = 3,16 \Omega$.



Obr. 40 Průběhy napětí na zátěži v odporovém režimu

6.4 Provoz v napět'ovém režimu

<u>Naměřené hodnoty napětí a proudů při napět'ovém režimu</u>							
$U_Z \approx 2 \text{ V}$		$U_Z \approx 10 \text{ V}$		$U_Z \approx 25 \text{ V}$		$U_Z \approx 39 \text{ V}$	
$I_Z [\text{A}]$	$U_Z [\text{V}]$	$I_Z [\text{A}]$	$U_Z [\text{V}]$	$I_Z [\text{A}]$	$U_Z [\text{V}]$	$I_Z [\text{A}]$	$U_Z [\text{V}]$
0	0	0	0	0	0	0	0
0,10	2,012	0,13	9,988	0,18	25	0,14	39,03
2,02	2,012	2,03	9,988	2,13	25	2,27	39,03
5,05	2,012	5,12	9,989	5,13	25,001	5,08	39,03
10,37	2,013	10,09	9,989	10,29	25	10,79	39,03
20,10	2,013	20,04	9,990	16,74	25	*	*
30,37	2,014	30,20	9,990	*	*	*	*
39,17	2,014	39,28	9,992	*	*	*	*

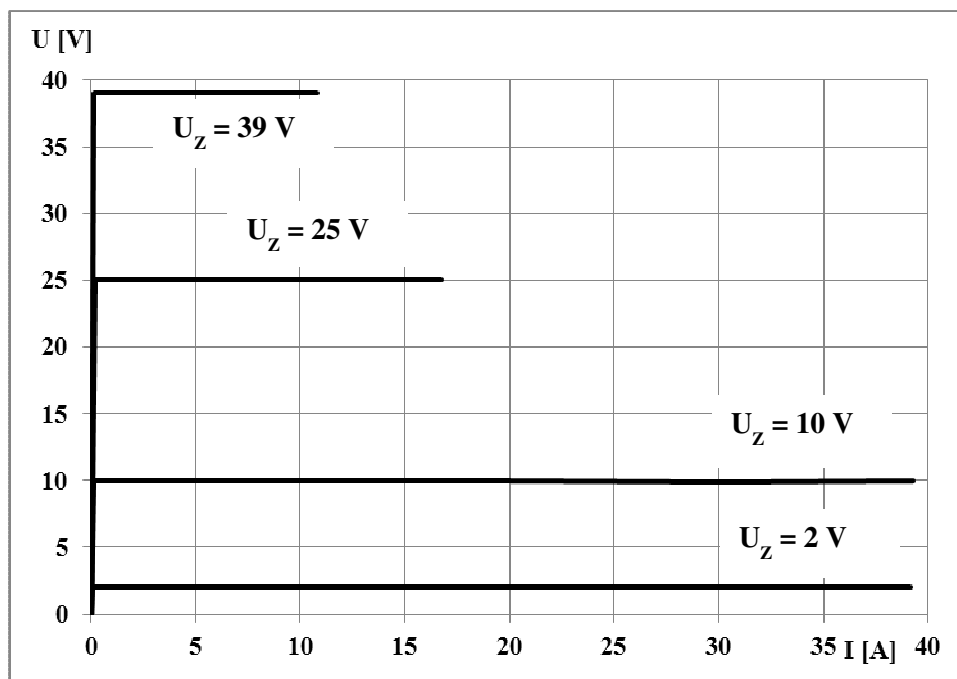
* mimo pracovní oblast(překročení povoleného ztrátového výkonu zátěže)

Jak vyplývá z tabulky naměřených hodnot, zátěž pracuje v napět'ovém režimu spolehlivě – napětí se při změně proudu téměř nemění. Zátěž se chová jako paralelní stabilizátor napětí (přesná výkonová Zenerova dioda). Běžně udávaným parametrem je tzv. dynamický odpor r_D , který udává vnitřní odpor stabilizátoru. Vlivem tohoto odporu roste napětí při zvýšení proudu, takže by tento odpor měl být co nejmenší. Při výpočtu lze použít např. hodnoty pro $U_Z = 10 \text{ V}$.

$$I_{Z1} = 0,13 \text{ A}; I_{Z2} = 39,28 \text{ A} \rightarrow \Delta I_Z = I_{Z2} - I_{Z1} = 39,28 - 0,13 = \underline{39,15 \text{ A}}$$

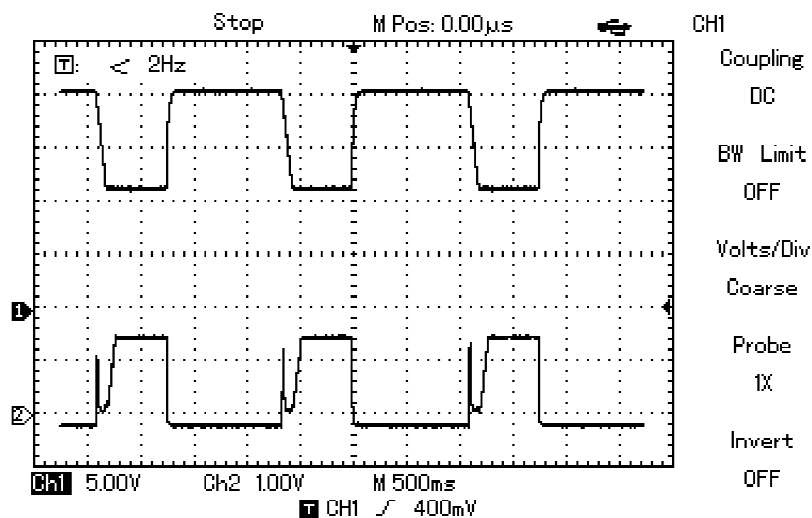
$$U_{Z1} = 9,988 \text{ V}; U_{Z2} = 9,992 \text{ V} \rightarrow \Delta U_Z = U_{Z2} - U_{Z1} = 9,992 - 9,988 = \underline{0,004 \text{ V}}$$

$$r_D = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} = \frac{0,004}{39,15} = 1,02 \cdot 10^{-5} \Omega = \underline{\underline{10,2 \mu\Omega}}$$



Obr. 41 Naměřená VA charakteristika zátěže v režimu U

Pro zajímavost jsou na obr. 42 zobrazeny průběhy napětí a proudu při zatěžování zdroje v napěťovém režimu a při pulsním provozu. Horní průběh je napětí (5 V/dílek), dolní průběh odpovídá proudu (10 A/dílek). Napětí zdroje naprázdno je cca 21 V a při zatěžování 12 V (nastaveno na zátěži). Proud zátěží je cca 16 A a je dán nastavením proudového omezení připojeného zdroje. Na průběhu proudu je patrný zákmit při nárůstu proudu, to je dáno vlastnostmi zdroje [20].



Obr. 42 Průběhy napětí a proudu v napěťovém režimu

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnutí a sestavení elektronické zátěže s možností připojení k PC. Výsledkem je přístroj umožňující zkoušet připojené zdroje o max. napětí 40 V, případně max. proudu 40 A. Protože je zátěž vybavena veškerými ovládacími a indikačními prvky potřebnými pro řízení na čelním panelu, je možné ji provozovat samostatně bez použití dalších přístrojů. Z praktických důvodů je zátěž vybavena různými ochrannými prvky, které chrání připojený zdroj i vlastní zátěž v případě chybné obsluhy a při závadě zátěže. Po připojení k PC je možné zobrazovat a zpracovávat naměřené hodnoty, případně ovládat zátěž, a tak do určité míry automatizovat její provoz.

Je zřejmé, že přístroj svými parametry nemůže konkurovat profesionálním zátěžím [22] s lepšími parametry (rozsah nastavení, přesnost) a většími možnostmi použití (dynamické testování). Nicméně je ukázkou toho, že s použitím běžných součástek a obvodů a při poměrně jednoduchém obvodovém řešení lze vytvořit zařízení, jehož parametry jsou pro běžné použití naprosto dostačující. Jak vyplynulo z provedených ověřovacích měření, vlastnosti v proudovém a napětovém režimu jsou dobré, v odporovém režimu je dosažená přesnost nastavení nižší.

Vzhledem k tomu, že pro řízení zátěže je použit MCU s poměrně velkou programovou pamětí (16 kB), kterou vytvořený program využívá z necelých 60 %, je možné provádět úpravy a rozšíření programu. K tomuto účelu je na desce řídicí jednotky osazen programovací konektor připojený k SPI rozhraní MCU, takže je možné programovat přímo v zapojení (ICSP) a není nutné vyjímat MCU z desky. Případnými úpravami programu by bylo možné doplnit zátěž dalšími funkcemi (nastavení strmosti nárůstu odebíraného proudu, vypnutí při dosažení určitého napětí na vnějším analogovém vstupu apod.). Další vylepšení by se mohlo týkat úpravy zapojení výkonové části tak, že by byl pro každý tranzistor vytvořen jednoduchý regulační obvod s OZ zajišťující regulaci proudu. Tak by se dalo docílit rovnoměrnějšího rozdělení proudu jednotlivými tranzistory, byť při obvyklém paralelním řazení s vyrovnávacími odpory je výsledek také vcelku vyhovující. Pak by pravděpodobně bylo možné zvýšit max. ztrátový výkon zátěže, protože chladiče s ventilátory jsou dimenzovány s dostatečnou rezervou.

Použitá literatura:

- [1] TICHÝ, I. *Elektronický rezistor*. Amatérské rádio A. 1988, č. 8, str. 294.
- [2] *Elektronická zátěž*. Konstrukční elektronika A Radio. 2002, č. 1, str. 3.
- [3] BELZA, J. *Elektronická zátěž*. [cit. 13. března. 2015]
<http://www.belza.cz/simple/aload.htm>
- [4] Elektronická Zenerova dioda. *KTE*. 1994, č. 4, str. 151.
- [5] 74HC573. Katalogový list, [cit. 20. listopadu 2014]
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74HC_HCT573.pdf
- [6] ATmega16. Katalogový list, [cit. 18. listopadu 2014]
<http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>
- [7] MCP1541. Katalogový list, [cit. 16. listopadu 2014]
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21653C.pdf>
- [8] OP27. Katalogový list, [cit. 16. listopadu 2014]
<http://www.tme.eu/cz/Document/cb37c000803c84f576c78ef443341db9/op27epz.pdf>
- [9] MCP4921. Katalogový list, [cit. 5. října 2014]
<http://www.gme.cz/img/cache/doc/321/016/mcp4921-e-p-datasheet-1.pdf>
- [10] 6N137. Katalogový list, [cit. 5. října 2014]
<http://www.gme.cz/img/cache/doc/523/182/6n137a-datasheet-1.pdf>
- [11] PALACKÝ, P. *Číslicová a mikroprocesorová technika*. VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [12] MAX232. Katalogový list, [cit. 5. října 2014]
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>
- [13] CH340. Katalogový list, [cit. 15. března 2015]
http://www.seeedstudio.com/wiki/images/7/7c/CH340DS1_EN.PDF
- [14] SK23. Katalogový list chladiče a obecné technické vysvětlivky, [cit. 15. března 2015]
<http://www.fischerelektronik.de/pim42/upload/fischerData/drawing/bigweb/sk23.jpg>
http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/cs/heatsinks/A01/Standardn%C3%AD%20lisovann%C3%A9%20chladi%C4%8De/PR/SK23_/index.xhtml#
- [15] *Katalog pojistkových systémů OEZ Varius*, [cit. 15. března 2015]
http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/4952-z02-13_cz_sk.pdf
- [16] KŘÍŽEK, J. *Algoritmy a datové struktury v jazyce Delphi*. Slezské gymnázium Opava, 2006.
- [17] *Tyristorové zdroje střídavé napětí typové řady AUT-3*. ZPA Košíře, 1977.
- [18] STRAŠIL, I. *Přesná elektronická zátěž*. Praktická elektronika A Radio. 2008, č. 5, str. 14.
- [19] BIČOVSKÁ, B. *Elektrická měření*. VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [20] *Stabilizovaný zdroj Z-YE 1T/X*. Mesit Uherské Hradiště, 1985.
- [21] MATOUŠEK, D. Aplikace procesoru ATmega644 v jazyce C. *Konstrukční elektronika A Radio*. 2011, č. 1.
- [22] *Elektronická zátěž Agilent 6060B*. Agilent Technologies, 2004.

Seznam příloh:

Příloha č. 1 – Dokumentace zdrojové části EZ

Příloha č. 2 – Dokumentace výkonové části EZ

Příloha č. 3 – Dokumentace ovládacího panelu EZ

Příloha č. 4 – Dokumentace řídicí jednotky EZ

Příloha č. 5 – Výpis programu MCU

Příloha č. 6 – CD (kompletní dokumentace)